

Percorsi abilitanti speciali
PAS

Corso di Abilitazione e didattica

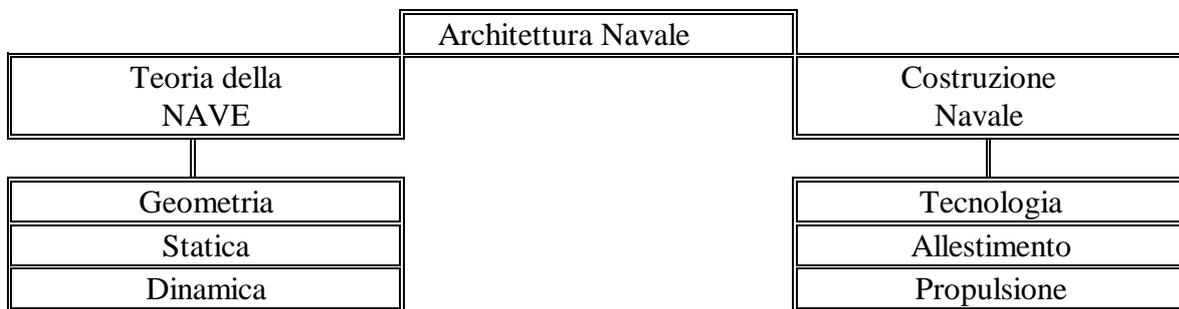
Arte navale ed elementi di costruzioni navali

a cura di: Amm. Giuliano ROSATI

L'ARCHITETTURA NAVALE

Tutte le cognizioni relative alle Navi (cioè alla forma, alle dimensioni, alla produzione, alle qualità nautiche, ai particolari di costruzione e di allestimento, alla manutenzione, alla riparazione, ecc.) formano oggetto della scienza che va sotto il nome di **Architettura Navale**.

L'Architettura Navale comprende due parti distinte: la Teoria della Nave e la Costruzione Navale.



La **Teoria della Nave**, facendo astrazione dai particolari costruttivi, considera la Nave nel suo insieme e ne fa lo studio dal punto di vista geometrico.

La Teoria della Nave viene ordinariamente suddivisa in tre parti, non nettamente distinte, che sono: la Geometria, la Statica e la Dinamica della Nave.

La **Geometria** individua le dimensioni lineari, di superficie e di volume della nave e ricerca l'ottimizzazione di tali dimensioni e dei relativi punti caratteristici (baricentri, centri di carena, ecc.,...) nell'ottica del progetto di base.

La **Statica**, che è la meccanica della Nave nelle condizioni di riposo, si occupa essenzialmente dello studio della stabilità.

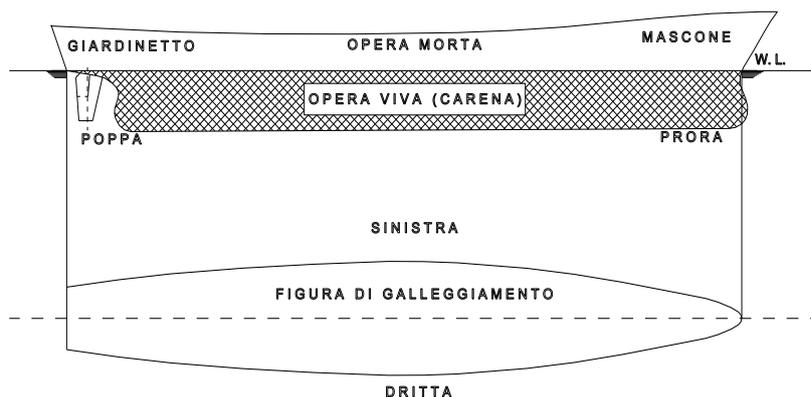
La **Dinamica** tratta della resistenza al moto, della manovrabilità, della tenuta al mare, dei mezzi propulsivi (elica).

La **Costruzione Navale** si occupa invece dello studio e della realizzazione delle parti che compongono la Nave nel suo insieme, dei materiali da costruzione, dei mezzi per metterli in opera, dell'allestimento, della propulsione, ecc..

Geometria della nave

Nomenclatura

Nave: galleggiante atto a muoversi sulla superficie del mare e dotato di propri mezzi di propulsione e governo

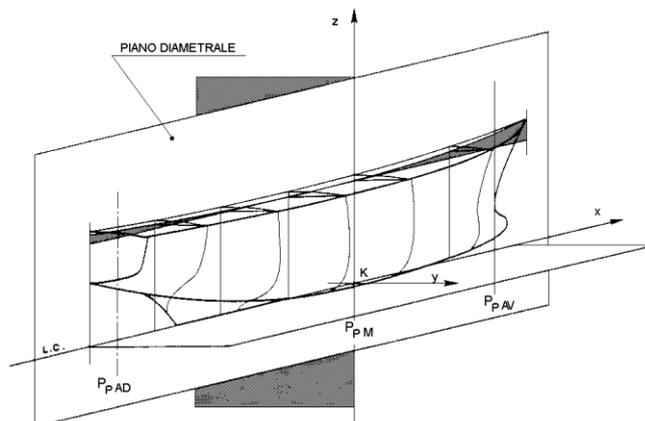


Scafo: è la parte che costituisce l'involucro stagno della nave. E' costituito dalla parte immersa detta OPERA VIVA o CARENA e dalla parte emersa detta OPERA MORTA; è chiuso superiormente dal PONTE DI COPERTA sul quale poggiano le sovrastrutture. Lo scafo è simmetrico rispetto ad un piano verticale longitudinale detto PIANO DIAMETRALE o di SIMMETRIA. Per un osservatore rivolto nel senso di avanzamento della nave le due parti definite dal longitudinale sono rispettivamente la dritta e la sinistra; la parte avanti è la PRORA o PRUA, la parte addietro è la POPPA. Le estremità risultano sempre affinate, la prora per separare la massa fluida, la poppa per colmare il vuoto lasciato dal passaggio della nave e per agevolare la sistemazione del propulsore e degli organi di manovra. tra le due parti affinate se ne trova una pressoché cilindrica detta ZONA MAESTRA.

Fasciame: è il rivestimento esterno dello scafo. Per le navi in acciaio è formato da lamiere fissate su un scheletro strutturale. Le dimensioni della nave verranno poi definite ENTRO o FUORI FASCIAME se misurate entro o fuori la superficie del fasciame.

Murate: sono la parte emersa dei fianchi della nave. La parte prodiera si dice MASCONO, quella poppiera GIARDINETTO. Per navi con poppa a incrociatore o "transom", si dice SPECCHIO la parte verticale di fasciame che chiude posteriormente lo scafo.

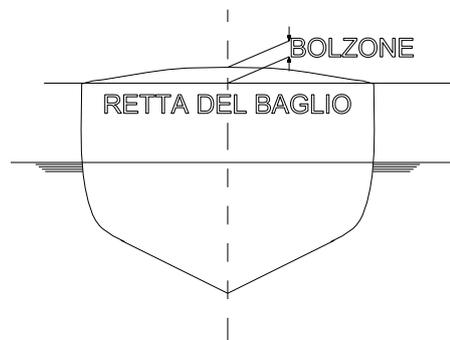
Insellatura (o cavallino): si dice LINEA DI INSELLATURA o CAVALLINO la proiezione sul piano diametrale della nave della linea di intersezione della superficie interna di ciascuna murata con la superficie inferiore del ponte di coperta.



Orlo: è la linea gobba che delimita superiormente le murate dello scafo.

Retta del baglio: è la retta orizzontale passante per l'intersezione tra il ponte di coperta e le murate della nave.

Bolzone: il ponte di coperta sul piano trasversale presenta una concavità rivolta verso il basso. L'innalzamento del ponte sulla retta del baglio misurato sul piano di simmetria si dice bolzone. Tale curvatura serve a far defluire fuori bordo l'eventuale acqua imbarcata in coperta.



Piano di galleggiamento: è la superficie di separazione tra parte immersa e parte emersa dello scafo; definisce il livello del fluido sul quale la nave galleggia.

Linea di galleggiamento: è la linea intersezione tra lo scafo ed il piano di galleggiamento. Le linee intersezioni tra lo scafo ed i piani paralleli al piano di galleggiamento si dicono LINEE D'ACQUA.

Figura (area) di galleggiamento: è la figura racchiusa dalla linea di galleggiamento.



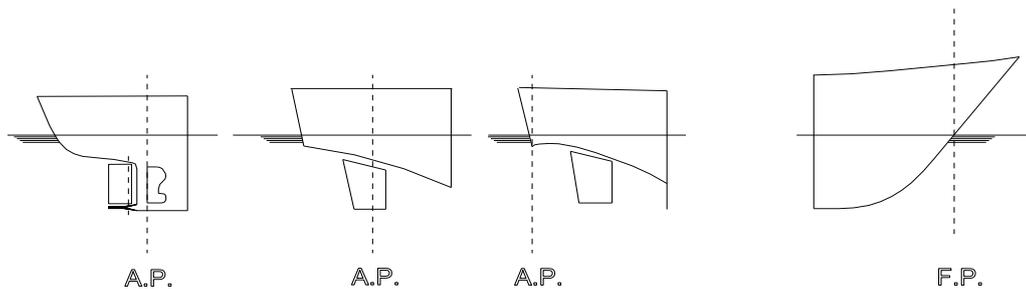
Centro di carena: è il baricentro del volume di carena.

Superficie di carena: è la superficie bagnata dello scafo.

Centro di galleggiamento: è il baricentro della figura di galleggiamento

Perpendicolare avanti P_{PAV} : è la perpendicolare al piano di galleggiamento di progetto passante per l'intersezione tra la traccia di tale piano con la superficie della struttura anteriore della nave detta RUOTA DI PRORA.

Perpendicolare addietro P_{PAD} : è, generalmente, la perpendicolare al piano di galleggiamento passante per l'asse di rotazione del timone.



Perpendicolare al mezzo P_{PM} : è la perpendicolare al piano di galleggiamento equidistante dalle due estremità.

Punto di chiglia: è l'intersezione tra il profilo dello scafo entro fasciame e la perpendicolare al mezzo.

Linea di costruzione o di base: è la retta orizzontale, giacente sul piano di simmetria e passante per il punto di chiglia.

Linea di chiglia: è la linea intersezione tra il piano di simmetria e la superficie entro fasciame dello scafo.

Linea di sottochiglia: è la linea parallela alla linea di chiglia dalla quale differisce dello spessore della chiglia. Viene indicata con L.S.CH.

Sovrastrutture: i ponti al di sopra della coperta prendono il nome di sovrastrutture. Si dicono CASSERI se estesi da murata a murata, altrimenti TUGHE. I casseri, a seconda della posizione, prendono il nome di cassero di poppa, centrale e di prora, quest'ultimo è detto anche CASTELLO.

Sezioni trasversali: si ottengono sezionando lo scafo con piani verticali normali al piano di simmetria longitudinale.

Sezione maestra: è la sezione trasversale che racchiude la massima area immersa.

Ponti:

- Ponte principale è il ponte continuo e resistente più in alto.
- Ponte di coperta è il ponte continuo più alto della nave, parzialmente o totalmente scoperto, delimitante verso l'alto lo scafo propriamente detto.
- Ponte di bordo libero è il più alto ponte completo le cui aperture situate nelle zone esposte sono provviste di mezzi permanenti di chiusura stagni.
- Ponte delle paratie stagne è il ponte stagno, continuo od a gradini, sotto cui sono intestate tutte le paratie stagne.
- Ponte del servizio di sicurezza è il ponte, generalmente coperto, coincidente o sovrastante il ponte delle paratie stagne, al di sopra del quale devono essere posti tutti i maneggi e le manovre a distanza degli impianti del servizio di sicurezza; esso può coincidere con il ponte di coperta. Sulle navi militari vengono denominati dall'alto verso il basso: Coperta, 1° Corridoio (o batteria), 2° Corridoio, ecc. Si dicono COPERTINI i ponti parziali. Lo spazio sottostante l'ultimo ponte si dice STIVA; il fondo della stiva si chiama SENTINA.

Dimensioni principali dello scafo

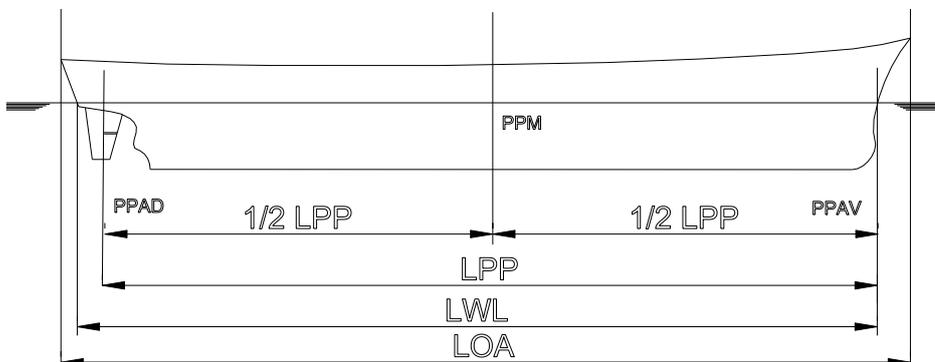
Lunghezza tra le perpendicolari L_{PP} : è la distanza tra perpendicolare avanti e perpendicolare addietro. E' una misura convenzionale che caratterizza molto bene una nave: non tiene infatti conto degli slanci di prora e di poppa e viene per questo utilizzata ai fini della resistenza al moto e della robustezza strutturale.

Lunghezza al galleggiamento L_{WL} : è la lunghezza della figura di galleggiamento.

Lunghezza fuori tutto L_{OA} : è l'ingombro longitudinale massimo della nave comprendente ogni appendice.

Larghezza al galleggiamento B : è la larghezza massima della figura di galleggiamento.

Larghezza massima B_{MAX} : è l'ingombro trasversale massimo della nave.

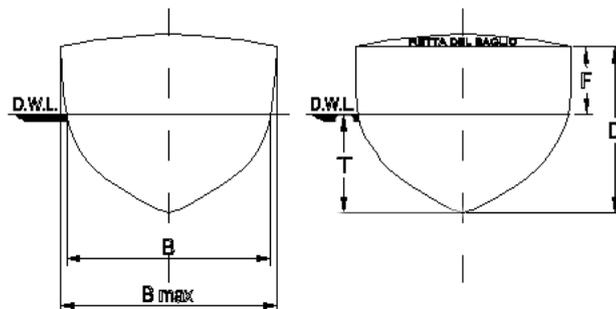


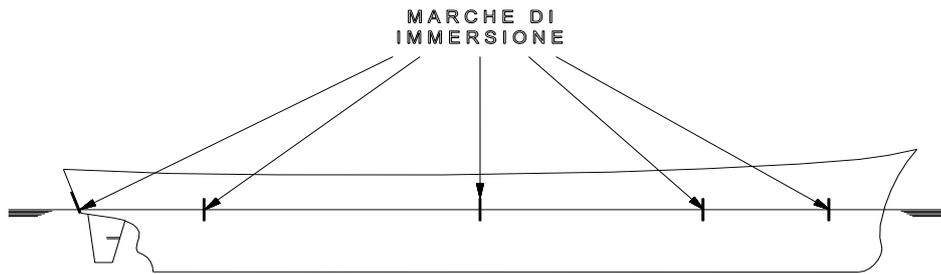
Altezza di costruzione D : viene definita come la distanza verticale tra linea di costruzione e retta del baglio in corrispondenza della perpendicolare al mezzo.

Immersione T : è la distanza verticale tra piano di galleggiamento e linea di sottochiglia. In particolare si definiscono: IMMERSIONE AVANTI, ADDIETRO, AL MEZZO, quelle in corrispondenza delle rispettive perpendicolari.

Pescaggio: è l'immersione massima che tiene conto anche di appendici di carena che possono sporgere al di sotto della linea di sottochiglia.

Marche di immersione: l'immersione viene letta con l'ausilio di apposite marche saldate a scafo dette marche di immersione. Tali marche si trovano in corrispondenza delle tre perpendicolari su entrambe le murate.





Volume di carena ∇ : è il volume racchiuso dallo scafo fino al piano di galleggiamento, cioè è il volume dell'opera viva.

Dislocamento Δ : è il peso della nave misurato solitamente in tonnellate. Per le navi militari vengono definiti diversi dislocamenti in funzione delle condizioni di carico previste:

- Dislocamento di nave scarica ed asciutta (senza liquidi, munizionamento ed equipaggio).
- Dislocamento alle prove (dislocamento a pieno carico – 1/3 dei carichi consumabili).
- Dislocamento di pieno carico.
- Dislocamento standard (dislocamento a pieno carico – peso dei liquidi per la propulsione).

Portata lorda: è la differenza tra dislocamento di pieno carico e quello di nave scarica ed asciutta. E' cioè il peso di tutto quello che la nave può trasportare.

Portata netta: è il peso del carico pagante, cioè delle merci, cose e persone trasportate.

Stazza: è la misura rappresentativa del volume degli spazi chiusi di una nave. E' dunque una misura di volume e viene calcolata in tonnellate di stazza pari a 100 piedi cubici inglesi (2,832 m³).

Bordo libero F : è la distanza verticale tra piano di galleggiamento di pieno carico e retta del baglio misurata in corrispondenza della perpendicolare al mezzo. Il suo valore minimo è stabilito per le navi mercantili da una apposita normativa internazionale la cui applicazione è controllata dai REGISTRI DI CLASSIFICAZIONE. Lo scopo del bordo libero è:

- a) costituire una riserva di spinta che è la differenza tra il peso di acqua che la nave sposterebbe quando fosse con il ponte di coperta affiorante ed il dislocamento di pieno carico;
- b) costituire una riserva di stabilità in modo che la nave possa reagire a forze inclinati trasversalmente in modo adeguato;
- c) dare alla nave una idonea altezza di piattaforma per preservare apparecchiature e personale da danni dovuti a colpi di mare.

Marche di bordo libero

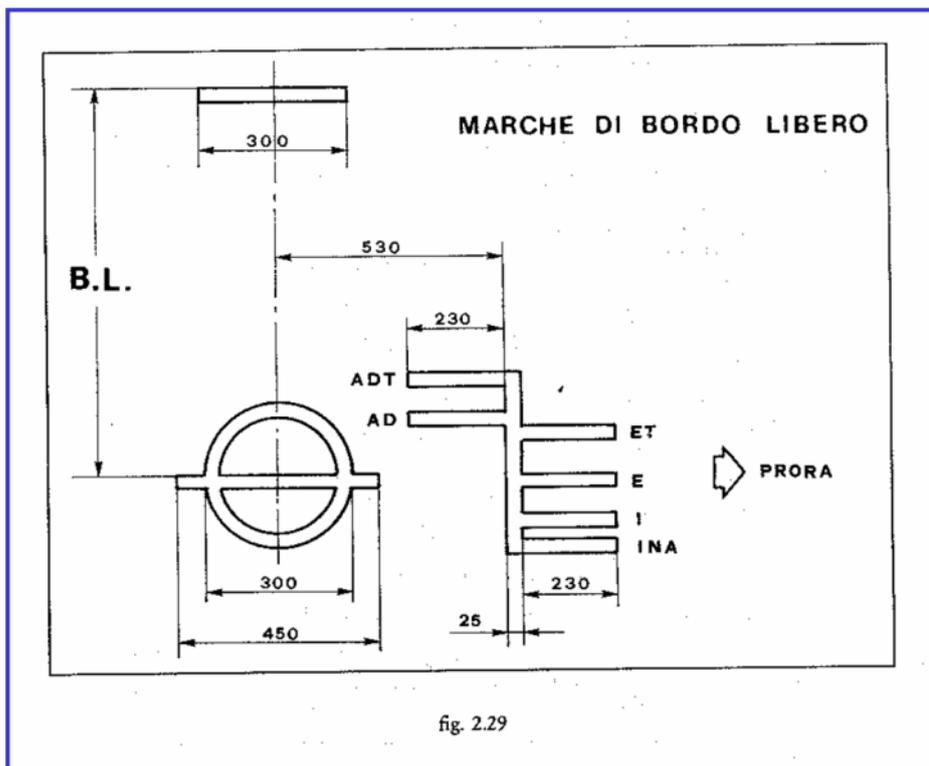
Il bordo libero definisce la massima immersione che la nave può avere in acqua salata nella stagione estiva. Essa è indicata dall'orlo superiore di una striscia orizzontale, posta sulle murate a metà nave, attorno a cui è posizionata una corona circolare nota come "occhio di Plimsoll".

Superiormente al disco è situata, su ambedue le murate, una striscia di metallo, saldata allo scafo, il cui orlo superiore è alla stessa quota della retta del baglio del ponte di bordo libero.

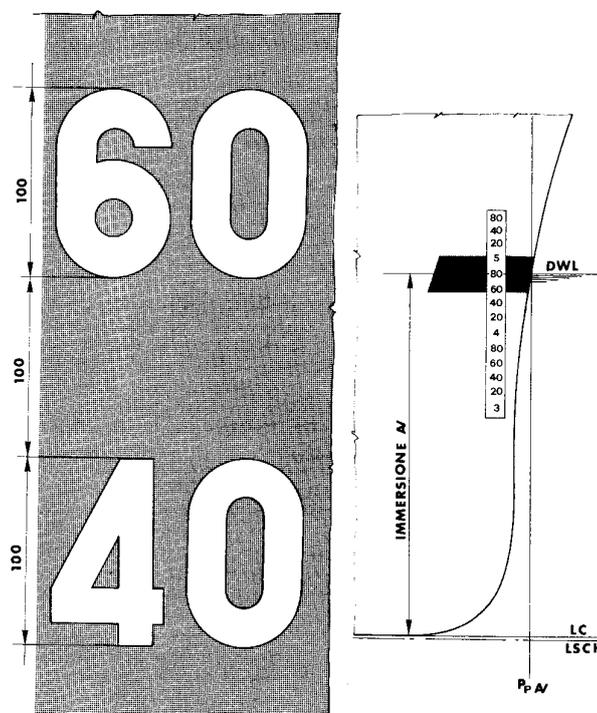
Sono inoltre presenti un certo numero di tacche complementari:

- INA MASSIMA IMMERSIONE INVERNALE NORD ATLANTICO
- I MASSIMA IMMERSIONE INVERNALE
- E MASSIMA IMMERSIONE ESTIVA
- ET MASSIMA IMMERSIONE ESTIVA TROPICALE
- AD MASSIMA IMMERSIONE ACQUA DOLCE
- ADT MASSIMA IMMERSIONE ACQUA DOLCE TROPICALE

Le zone ed i periodi stagionali sono riportati sopra una cartina allegata al regolamento di bordo libero.



Marche di immersione



Registri di classificazione

I registri di classificazione sono enti che hanno molteplici compiti, i più importanti dei quali sono:

- approvazione dei disegni elaborati dai cantieri
- sorveglianza e classificazione delle nuove costruzioni
- sorveglianza sulle riparazioni e trasformazioni delle navi già classificate
- sorveglianza periodica su scafo, apparato motore ed allestimento
- collaudo dei materiali impiegati per la costruzione e la riparazione
- verifica delle condizioni di stabilità
- verifica della sicurezza della vita umana in mare
- assegnazione del bordo libero.

A tali fini i registri stabiliscono delle norme alle quali i costruttori devono attenersi per quanto riguarda il dimensionamento di strutture, la costruzione di apparati motore, linee d'assi, eliche ecc., la scelta dei materiali, le loro lavorazioni e la scelta dell'allestimento.

Queste norme sono raccolte in volumi che vengono continuamente aggiornati in base al progresso tecnologico.

I Registri più importanti sono quelli che operano in paesi che hanno una maggiore tradizione nel campo delle costruzioni navali mercantili; tra questi ricordiamo: il Lloyd's Register (Gran Bretagna), l'American Bureau of Shipping (USA), il Norske Veritas (Svezia, Norvegia), l'IJMC (Giappone), il Bureau Veritas (Francia), il RINa (Italia).

Tutta la flotta mercantile mondiale è iscritta ad uno o più registri di classificazione che assegnano a ciascuna nave una classe in base alle qualità nautiche e strutturali rilevate dalle visite dei propri ispettori ed in base al tipo di impiego.

In Italia il primo istituto di classifica fu fondato nel 1861 con il nome di Registro Navale. Attualmente le funzioni del Registro (oggi RINa) assumono una duplice veste: come Ente Pubblico, delegato dallo Stato, con compiti riguardanti la stazzatura delle navi, l'assegnazione del bordo libero, l'accertamento della navigabilità e della sicurezza della vita umana in mare; come ente privato per i compiti restanti.

Per ognuna di queste operazioni il RINa rilascia un'apposita certificazione probatoria.

Coefficienti caratteristici delle carene

Per caratterizzare ulteriormente la geometria della nave è bene definire dei rapporti e dei coefficienti adimensionali utilizzabili nella fase di progettazione ed in qualsiasi confronto tra carene diverse. I parametri usati si riferiscono alle condizioni di carico di progetto a meno che non sia diversamente specificato.

I principali rapporti sono:

- lineari
- di superficie
- di volume

Rapporti lineari:

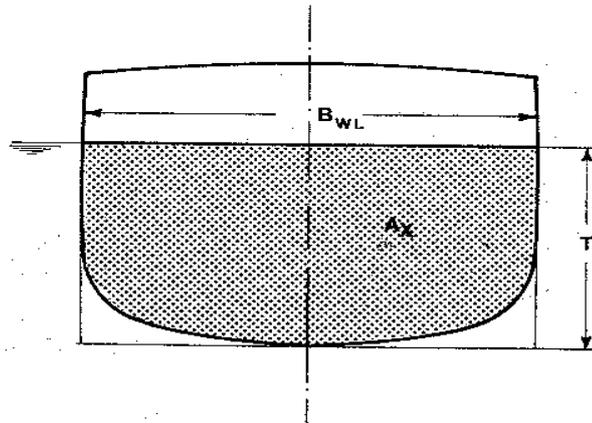
- L/B dà un' idea della snellezza della nave (4-10)
- B/T è in relazione con la stabilità e la forma trasversale della carena (1.8-4.5)

Rapporti di superficie

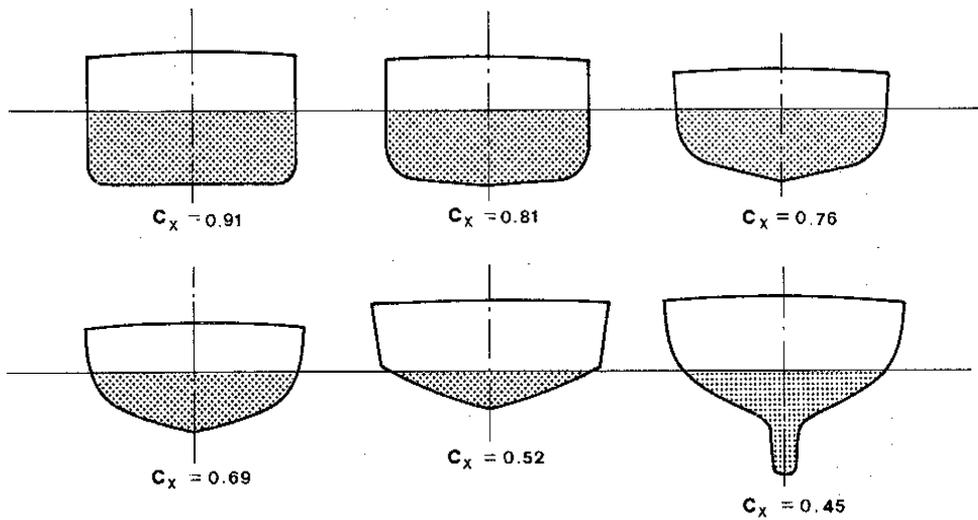
- Coefficiente di finezza della sezione maestra:

$$C_x = \frac{Ax}{B_{wl} * T}$$

dove A_x , B_{wl} e T sono rispettivamente l' area immersa, la larghezza e l' immersione



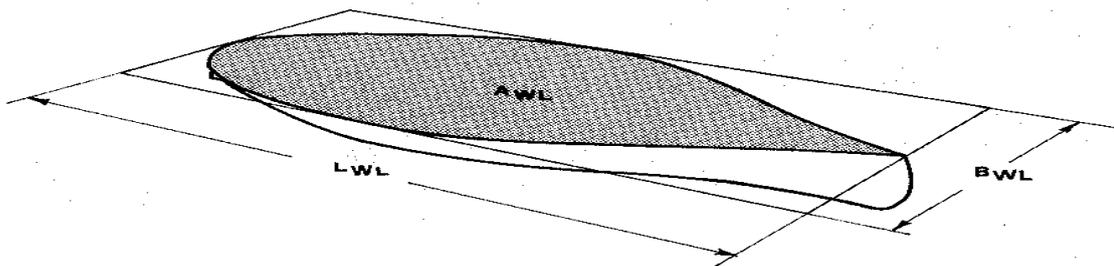
della sezione maestra.



- Coefficiente di finezza al galleggiamento:

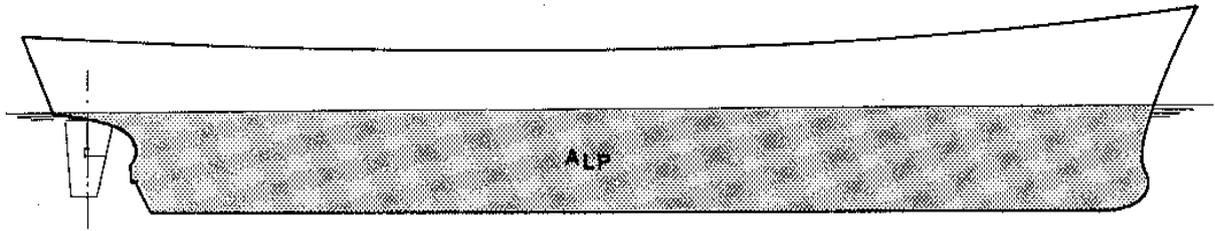
$$C_{wl} = \frac{A_{wl}}{B_{wl} * L_{wl}}$$

dove A_{wl} , B_{wl} e L_{wl} sono rispettivamente area, larghezza e lunghezza della figura di galleggiamento.



- Coefficiente di deriva:

$$C_{lp} = \frac{A_{LP}}{L_{wl} * T}$$

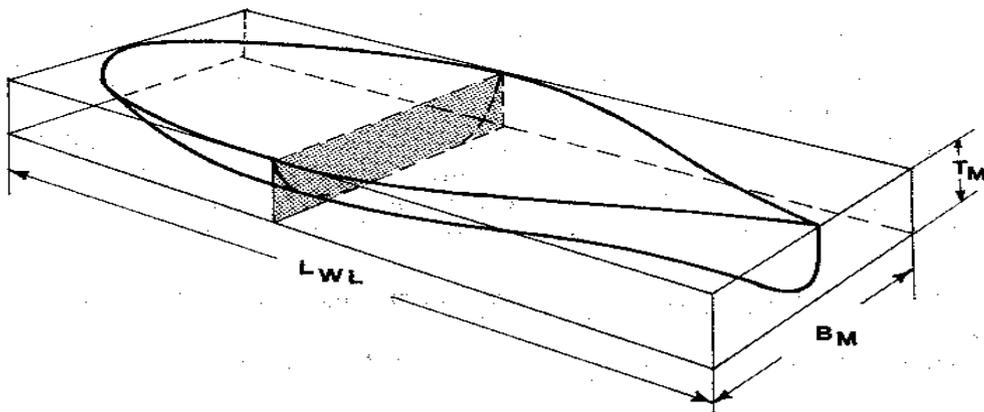


Rapporti di volume:

- Coefficiente di finezza totale:

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{wl} B_{wl} T_{wl}}$$

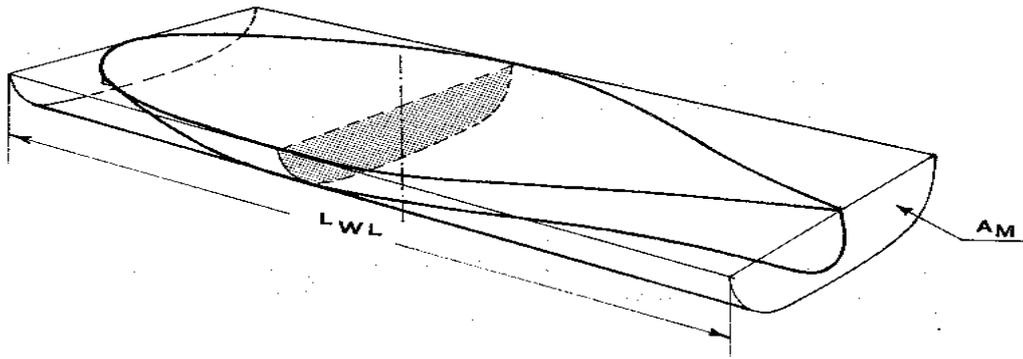
è il rapporto tra il volume della carena ed il parallelepipedo che ha come dimensioni lunghezza, larghezza ed immersione.



- Coefficiente di finezza longitudinale o prismatico:

$$C_p = \frac{\nabla}{A_m L_{wl}}$$

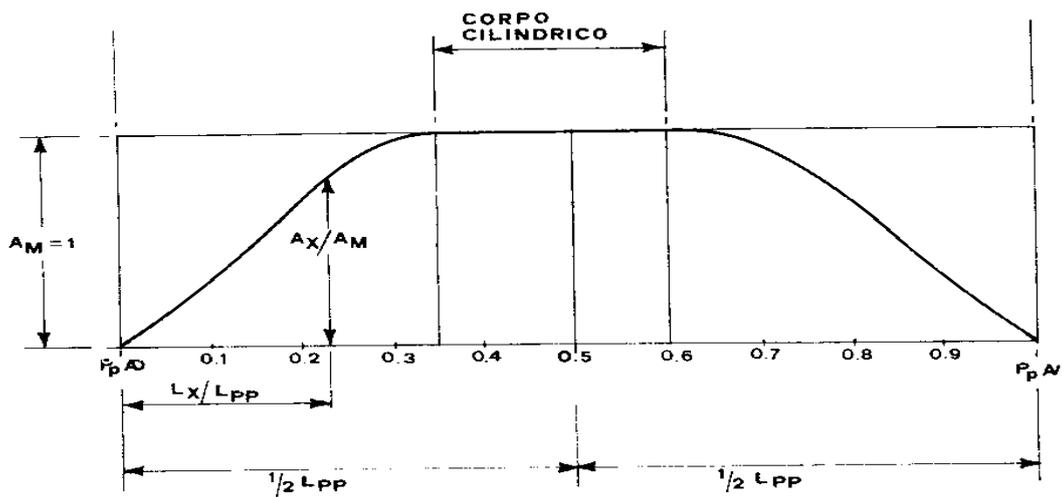
è il rapporto tra il volume della carena e quello del solido avente come altezza la lunghezza al galleggiamento e come base la sezione maestra.



Il coefficiente di finezza longitudinale C_P è indice della distribuzione lungo l'asse Y del volume di carena: a parità di volume e di lunghezza quella avente il C_P più piccolo presenterà un' area immersa della sezione maestra maggiore e quindi una concentrazione di volume nella zona maestra, mentre la carena avente il C_P più grande sarà caratterizzata da volumi distribuiti più uniformemente su tutta la lunghezza.

Ciò può essere evidenziato graficamente riportando in un diagramma le aree delle sezioni immerse in funzione della loro posizione longitudinale.

Dall'eguaglianza dei volumi deriva che l' area sottesa alle due curve è la stessa.



PIANO DI COSTRUZIONE

Ogni carena presenta una superficie a doppia curvatura derivante da analisi di tipo sperimentale su modelli intesi ad ottenere la minima resistenza al moto compatibilmente alle esigenze di impiego della nave.

Non essendo possibile rappresentare la carena univocamente con un unico disegno o mediante una espressione analitica, si ricorre ad una rappresentazione grafica della superficie fuori ossatura detta PIANO DI COSTRUZIONE.

Rappresentazione della superficie di uno scafo

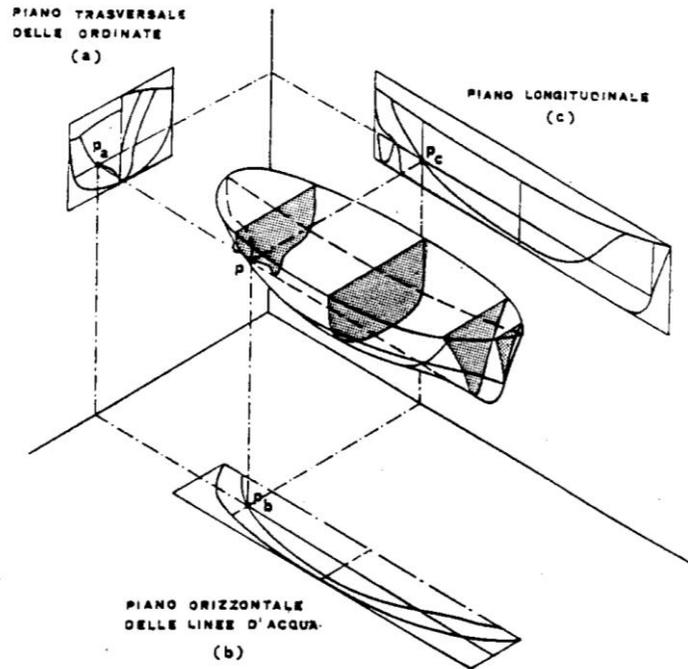
Si suole rappresentare la superficie di uno scafo in triplice proiezione ortogonale assumendo come riferimento (fig. 3.1):

- un piano longitudinale parallelo al piano di simmetria disposto verticalmente;
- un piano orizzontale parallelo al piano di galleggiamento di pieno carico;
- un piano trasversale normale ai primi due.

Le proiezioni segnate su questi piani di un certo sistema di linee scelte opportunamente costituiscono i cosiddetti piani di costruzione: questi si rappresentano ribaltati su di un unico piano che è quello del disegno.

I piani di costruzione vengono disegnati fuori ossatura per gli scafi in acciaio (ossia non si tiene conto del fasciame esterno) ed in essi si dispone lo scafo con la prora rivolta verso la destra di chi guarda il disegno.

Per l'esistente simmetria rispetto al piano longitudinale diametrale si disegna soltanto una metà del piano orizzontale e del piano trasversale, ed in quest'ultimo non si sovrappone il corpo prodiero a quello poppiero, ma questi si disegnano separatamente a destra ed a sinistra del piano di simmetria.

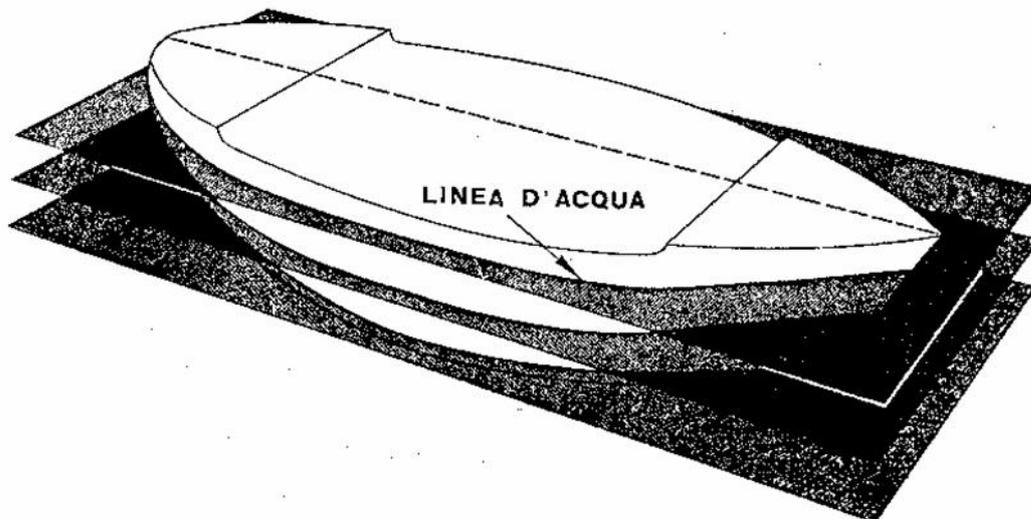


Nel piano longitudinale si rappresentano:

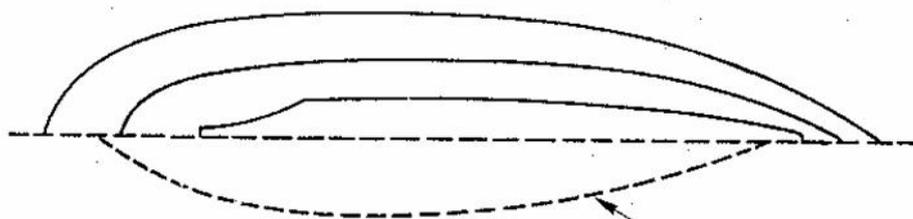
- il contorno della nave limitato in basso dalla linea di costruzione LC, in alto dall'orlo a murata e lateralmente dai profili delle estremità di prora e di poppa;
- le tracce dei piani orizzontali o "linee d'acqua" (tra cui il piano di galleggiamento di progetto) numerandole dal basso in alto (0 coincide con la linea di costruzione);
- le tracce dei piani trasversali o "ordinate" normali al piano di simmetria ed alla linea di costruzione, numerandole a partire dall'estremità di poppa con lo zero coincidente con la perpendicolare addietro (P_{PAD});
- le sezioni (dette *longitudinali*) in vera configurazione ottenute con piani longitudinali paralleli al piano di simmetria, numerandole a partire da quella più prossima al piano di simmetria stesso.

Nel piano orizzontale si rappresentano:

- la traccia del piano di simmetria;
- le sezioni (dette *linee d'acqua*) in vera configurazione ottenute con piani paralleli al piano di galleggiamento di progetto;
- la proiezione dell'orlo a murata;
- le tracce delle sezioni longitudinali;
- le tracce delle ordinate.



LINEE D'ACQUA

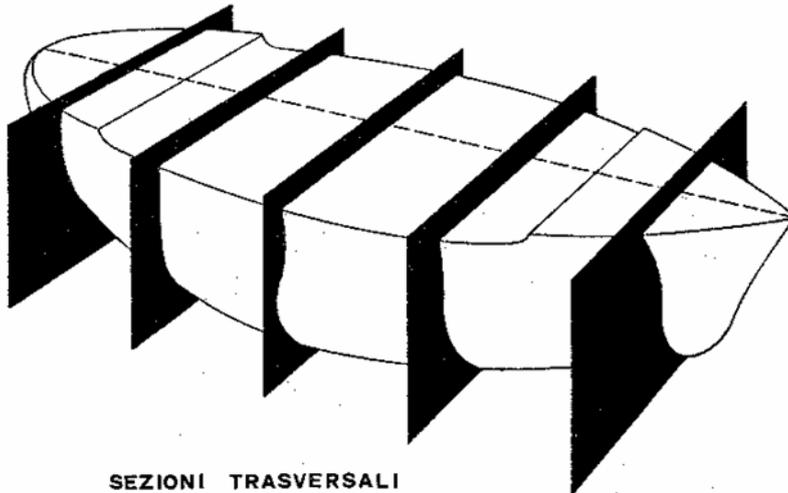


CURVA DI FORMA

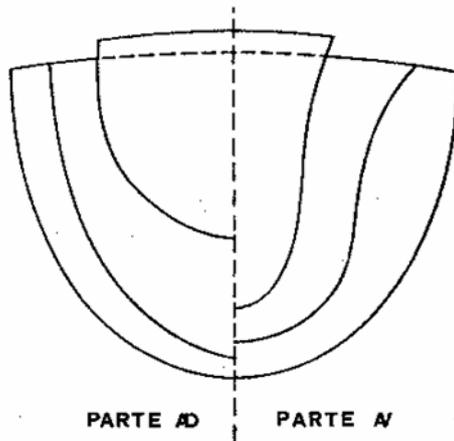
L'insieme dei piani longitudinale ed orizzontale è sufficiente ad individuare la superficie considerata, ma si usa disegnare sempre anche il piano trasversale.

Nel piano trasversale si rappresenta, a destra del piano di simmetria, il corpo prodiero e a sinistra il corpo poppiero, in questo caso saranno segnati:

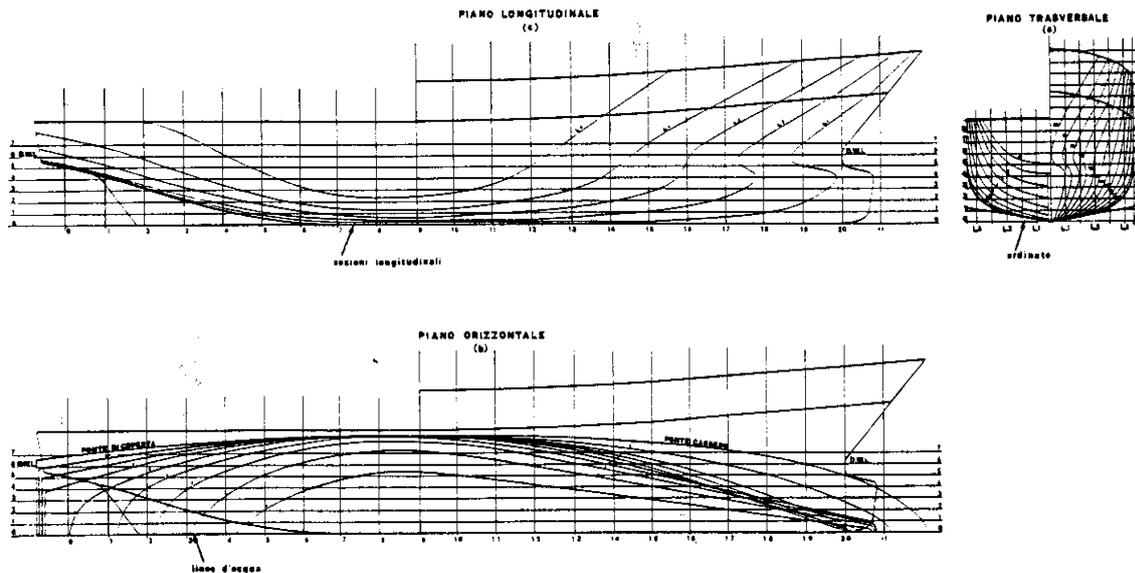
- la proiezione dell'orlo;
- le sezioni (dette *ordinate*) in vera configurazione ottenute con piani trasversali;
- le tracce dei piani delle linee d'acqua;
- le tracce delle sezioni longitudinali.



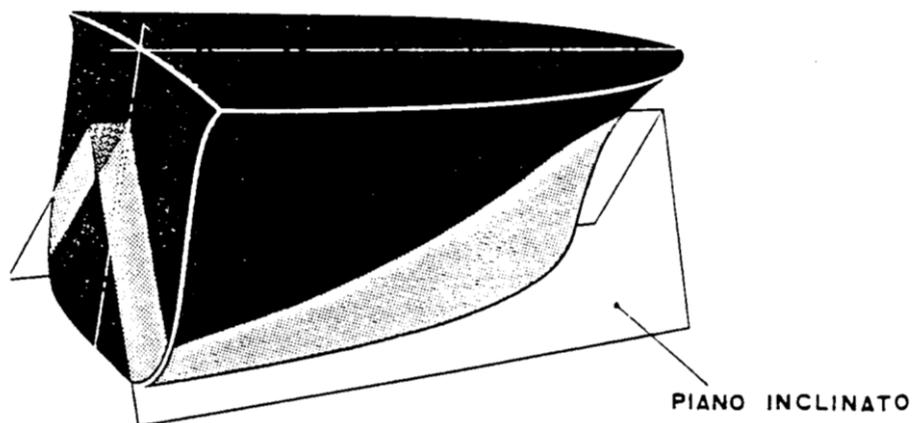
SEZIONI TRASVERSALI



Tutte le sezioni e curve rappresentate devono risultare avviate e, tra i tre piani, devono intercedere le relazioni di corrispondenza imposte dalla Geometria Descrittiva. Il Piano di Costruzione deve risultare, pertanto, **bilanciato** ed **equilibrato**. In fig. è riportato un piano di costruzione.



Complemento utile di un piano di costruzione è il piano delle forme nel quale si rappresentano, in un piano orizzontale, i ribaltamenti delle sezioni prodotte da piani inclinati (detti piani delle forme) che si assumono normali ai piani delle ordinate ed inclinati in modo che le loro tracce nel piano trasversale risultino, per quanto possibile, normali al maggior numero di ordinate.



Il Piano delle forme

Nel piano delle forme si rappresentano:

- i ribaltamenti (forme) in un piano orizzontale delle sezioni prodotte dai piani delle forme;
- le tracce dei piani delle ordinate.

Per comodità le forme possono essere rappresentate nel piano orizzontale.

Come evidenziato da quanto detto, le forme servono per controllare l'avviamento e mostrare l'andamento della carena nelle zone che, a causa delle elevate curvature, vengono male individuate dalle linee d'acqua.

Esecuzione pratica del piano di costruzione

Il reticolo

Al fine di ottenere un piano di costruzione preciso e di semplificarne l'esecuzione, è importantissimo il corretto tracciamento del reticolo che è la prima fase del disegno.

Il reticolo è costituito da tre serie di tracce:

- a) una nel piano longitudinale (tracce dei piani orizzontali e trasversali)
- b) una nel piano orizzontale (tracce dei piani longitudinali e trasversali)
- c) una nel piano trasversale (tracce dei piani longitudinali ed orizzontali)

Per costruire il reticolo nei piani longitudinale ed orizzontale si traccia la linea di costruzione LC nel piano longitudinale posizionando la riga con una tacca su un punto di riferimento; si individua su detta linea un segmento corrispondente alla lunghezza tra le perpendicolari L_{PP} e lo si divide in parti uguali (10 o 20 a secondo della Lunghezza) con la seguente metodologia (consideriamo di dividere in venti parti):

- si calcola matematicamente la distanza tra due ordinate $L_{PP}/20$
- si fissa un asse cartesiano con origine nella P_{PAD} e coincidente con la LC
- si calcolano le ascisse dei 21 piani trasversali
- si riportano sull'asse cartesiano, leggendone le ascisse sulla riga, i punti così individuati che rappresentano le tracce delle linee intersezione dei piani trasversali con il piano orizzontale passante per la LC.

Questo metodo si basa sul principio della quotatura in parallelo che presenta il pregio, rispetto a quella in serie, di non accumulare gli inevitabili errori di misura.

Per evitare, comunque, grossolani errori dovuti a sviste è utile un controllo, effettuato con un compasso, dell'eguaglianza degli intervalli.

Il successivo passo consiste nel tracciare, con l'ausilio di un compasso, tre perpendicolari alla LC, rispettivamente in corrispondenza delle ordinate 0 (P_{PAD}), 20 (P_{PAV}) e di un punto intermedio, per esempio la ordinata 10 (P_{PM}).

Si segnano su ogni perpendicolari tre punti:

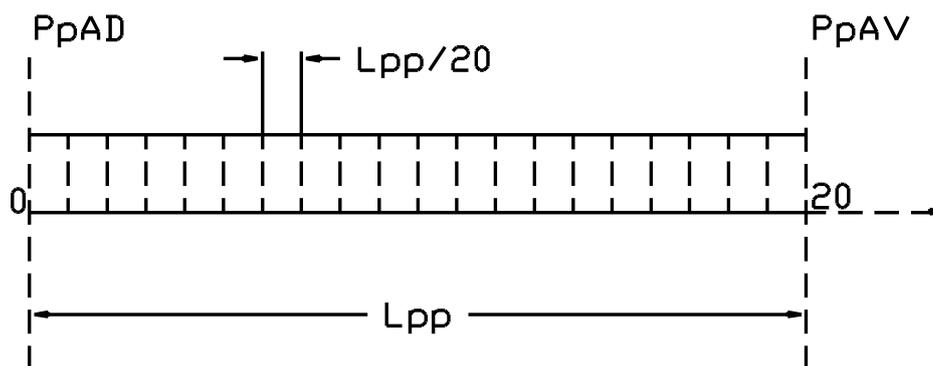
- uno superiormente tale che la sua distanza dalla LC sia pari all'altezza di costruzione D che è nota.
- gli altri due, inferiormente, in modo che la loro distanza sia pari alla semilarghezza $B/2$ (anch'essa nota), individuando così, il reticolo delle linee d'acqua. Con una disposizione di questo tipo, è conveniente lasciare un'adeguata distanza tra i due reticoli per conferire chiarezza al disegno.

Si uniscono tali punti controllando la loro rispettiva distanza (L_{PP} o $L_{PP}/2$)

Con lo stesso metodo descritto in precedenza per segnare le ordinate sulla LC, si segnano le stesse ordinate sulle tre parallele alla LC. A seguire si opera un controllo con il compasso.

Si prosegue tracciando le rimanenti perpendicolari alla LC, rappresentanti la tracce dei piani trasversali per ogni ordinata.

In maniera perfettamente analoga si tracciano le parti al di fuori dalla P_{PAV} e dalla P_{PAD} in modo da coprire, con il reticolo, l'intera lunghezza fuori tutto della nave. È da notare come tali due zone aggiuntive vadano suddivise in un numero di ordinate (numerare con valori maggiori di 20 AV e minori di 0 AD) adeguate rispetto all'estensione di tali zone.



Consideriamo il longitudinale: per completarne il reticolo occorre segnare le tracce dei piani orizzontali, più comunemente detti piani delle linee d'acqua.

Generalmente si procede in modo da avere una linea d'acqua ogni 0,5 m. di immersione, partendo dalla linea di sottochiglia, per tutta la zona del ginocchio della sezione maestra, zona in cui si hanno rapide variazioni della forma delle linee d'acqua stesse. Crescendo in immersione si segnano una linea d'acqua ogni 1 o 2 m, a seconda delle dimensioni della nave.

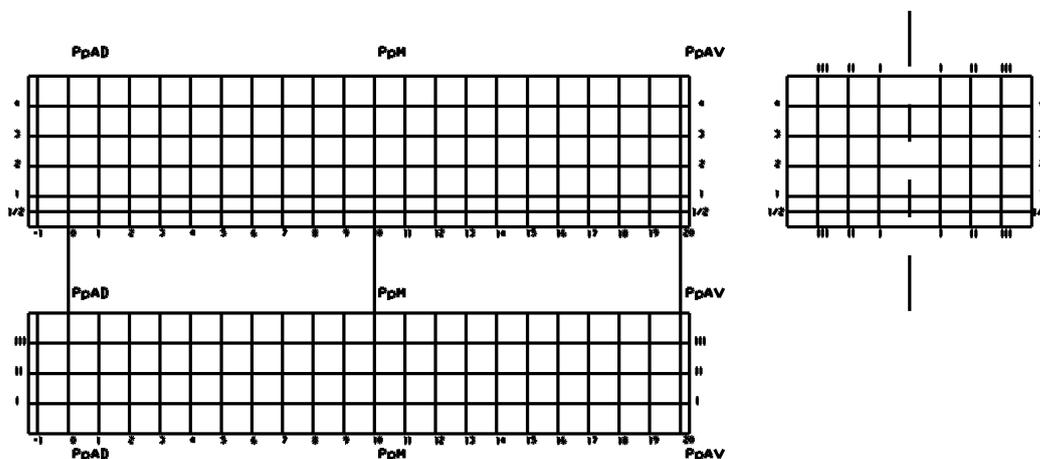
A completamento del reticolo del longitudinale, si indicano sulle P_{PAD} , P_{PAV} e sulla P_{PM} i punti corrispondenti a tali immersione; con la metodologia già descritta si tracciano le parallele alla LC passanti per tali punti.

Passiamo ora al reticolo delle linee d'acqua: vanno segnate su di esso, a completamento di quanto già fatto, le tracce dei piani longitudinali. Tali piani sono in numero dipendente dalla semilarghezza e dalla forma della carena, in genere sempre in numero maggiore od uguale di tre.

Per segnare queste tracce si procede analogamente a quanto descritto per quelle dei piani orizzontali (linee d'acqua).

A questo punto il reticolo del verticale risulta determinato dalle due serie di piani già tracciate nella realizzazione dei due reticoli longitudinale ed orizzontale. Ne risulta un disegno come quello mostrato nella figura 3.4.

Naturalmente vale la considerazione, più volte ripetuta, di effettuare un accurato controllo, durante il lavoro, dell'eguaglianza dei segmenti individuati dalle intersezioni tra le tracce dei piani tramite compasso.



Determinazione dei punti rappresentativi

A livello progettuale, una volta individuate le caratteristiche generali della carena, la determinazione dei punti caratteristici necessari per la tracciatura del disegno del piano di costruzione può essere effettuato con uno dei seguenti metodi:

- trasformazione per affinità di un piano di costruzione esistente;
- modifica del corpo cilindrico;
- disegno ex novo;
- impiego di serie sistematiche di carene.

Trasformazione per affinità

Trasformare per affinità un piano di costruzione significa:

- a) modificare le lunghezze moltiplicandole per un coefficiente “ λ ”;
- b) modificare le larghezze moltiplicandole per un coefficiente “ μ ”;
- c) modificare le immersioni moltiplicandole per un coefficiente “ τ ”.

Per impiegare questo metodo bisogna possedere il piano di costruzione di una nave esistente; il nuovo piano di costruzione sarà ricavabile dal vecchio modificando tutte le dimensioni moltiplicandole per i rispettivi rapporti di affinità (λ, μ, τ).

Il volume ed i rapporti caratteristici varieranno rispetto a quelli della nave modello in funzione dei rapporti di affinità; oltre a conservarsi i coefficienti di finezza, non si modifica neppure la posizione longitudinale del centro di carena, espressa come percentuale della lunghezza, né la sua posizione verticale, espressa in percentuale dell’immersione.

I fattori λ , μ e τ possono ricavarsi direttamente dal rapporto tra le dimensioni che si vogliono realizzare nel progetto e quelle corrispondenti del modello, come pure si possono ottenere imponendo tre condizioni qualunque ai rapporti dimensionali ed ai volumi di carena.

Se λ , μ e τ sono uguali, si opera in similitudine (che è un caso particolare di affinità).

Modifica del corpo cilindrico

Nota una carena è possibile conoscerne il volume della parte avanti e quello della parte addietro escludendo il corpo cilindrico.

Inserendo un corpo cilindrico di lunghezza opportuna si otterrà una carena avente un volume pari a quello richiesto di progetto.

Questa procedura si presta se si vogliono modificare i coefficienti di finezza (con esclusione della sezione maestra) e la posizione longitudinale del centro di carena (può essere variata anche sensibilmente in funzione dell’estensione della trancia cilindrica inserita o tolta rispetto al piano di costruzione modello).

Trasformazione per affinità e modifica del corpo cilindrico

I due metodi precedentemente descritti si possono applicare contemporaneamente ottenendo lo stesso effetto qualunque sia l’ordine con cui vengono applicati.

Disegno ex novo del piano di costruzione

Una volta determinata la curva delle aree (e quindi anche la posizione longitudinale del centro di carena) e le dimensioni principali, si può disegnare direttamente il piano di costruzione.

Una possibile procedura è la seguente:

- si traccia una possibile figura di galleggiamento
- si disegnano l'ordinata maestra e tre ordinate pressoché equidistanti della parte avanti e tre della parte addietro in modo che ognuna abbia l'area stabilita dalla curva delle aree e che siano avviate tra loro.
- rilevando le semilarghezze sulle ordinate tracciate, si disegnano due linee d'acqua e si controlla che i punti risultino avviati e che sia avviato il passaggio dall'una all'altra linea d'acqua.
- si eseguono successive modifiche delle ordinate inizialmente tracciate e delle linee d'acqua fino ad ottenere un andamento soddisfacente
- si ricavano le sezioni longitudinali prendendo i punti sia dalle ordinate che dalle linee d'acqua facendo, se necessario, ulteriori modifiche.
- si procede disegnando le ordinate e le linee d'acqua mancanti eseguendo continuamente controlli ed apportando, ove si rendano necessarie, le opportune modifiche.

Impiego delle serie sistematiche di carena

Si utilizza il diagramma caratteristico, il quale identifica una famiglia di carene aventi le medesime caratteristiche di forma. Esso si può ricavare da una qualsiasi carena della famiglia, purché sia noto il piano di costruzione e la curva delle aree.

In esso vengono riportate, in funzione delle aree alle varie ordinate, le rispettive semilarghezze come frazione dei rispettivi valori massimi.

Per disegnare una qualsiasi carena della famiglia, di cui sia nota la curva delle aree, basta leggere su tale curva l'area della sezione che si vuole disegnare e poi entrare con questo valore (adimensionalizzato con l'area della sezione maestra) nel diagramma caratteristico dal quale si ottengono le semilarghezze (adimensionalizzate con il valore della massima semilarghezza) della sezione alle varie immersioni. Tutti gli elementi di una carena disegnata con questo metodo possono venire fissati a priori in maniera arbitraria, salvo rispettare le reciproche relazioni. Fa eccezione il coefficiente di finezza della sezione maestra il quale è fisso per tutte le carene ottenute da uno stesso diagramma caratteristico.

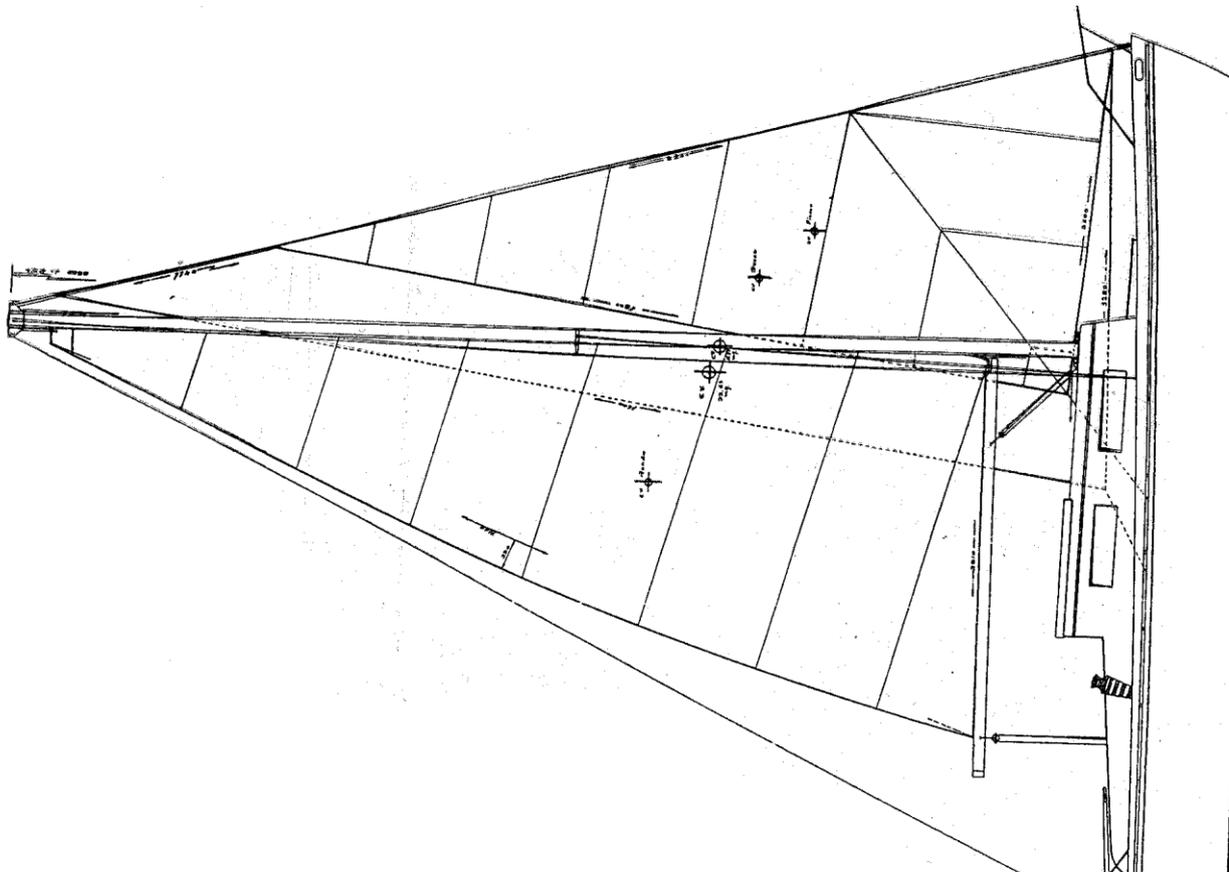
SERIE di TAYLOR : per carene a dritto verticale, bielica - affinità geometrica e variazione diagramma aree sezioni

Serie 60 o di TODD : per navi mercantili monoelica-5 carene madri, affinità geometrica ,CB fisso , centro di carena fisso ,

SERIE B.S.R.A.(British Ship Research Association di Marwood e Bailey) principio di sovrapposizione degli effetti; vengono fatti variare sistematicamente CB, B/T, ,posizione del centro di carena.

SERIE N.P.L.(National Physical Laboratory): per navi militari e da diporto - costanti CB,CX,CP, modifica in affinità di diversi B/T e ©

51007

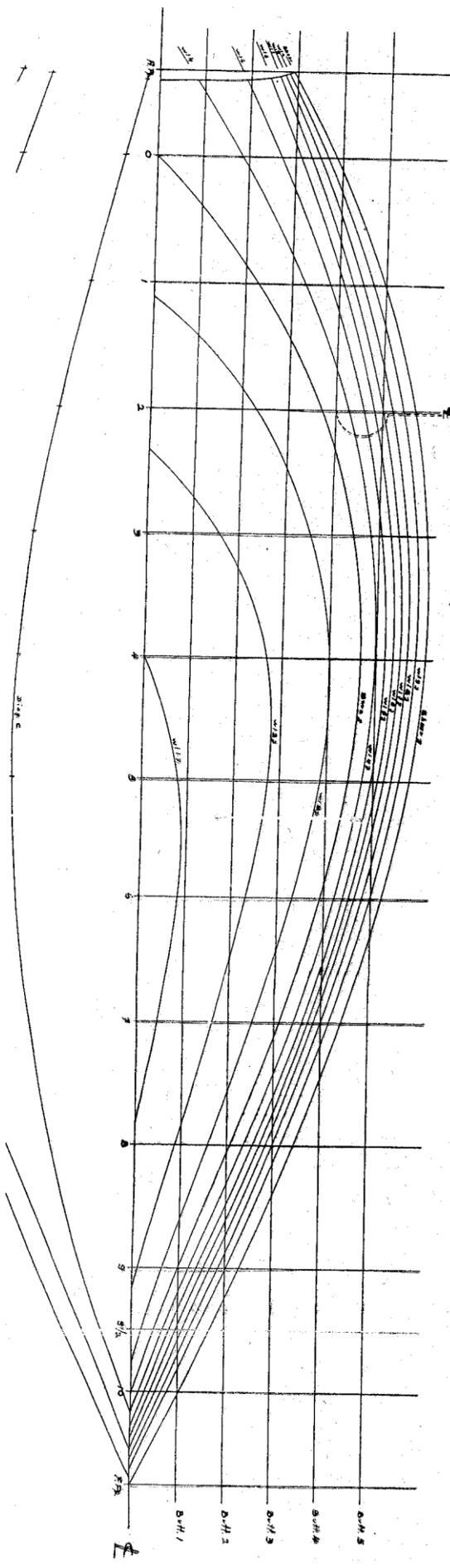
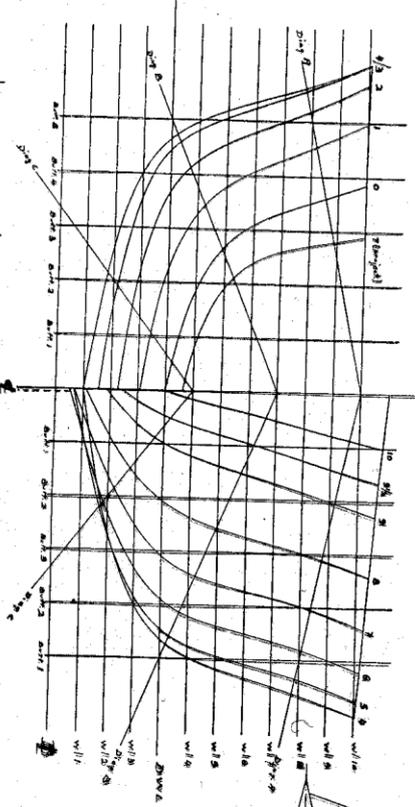
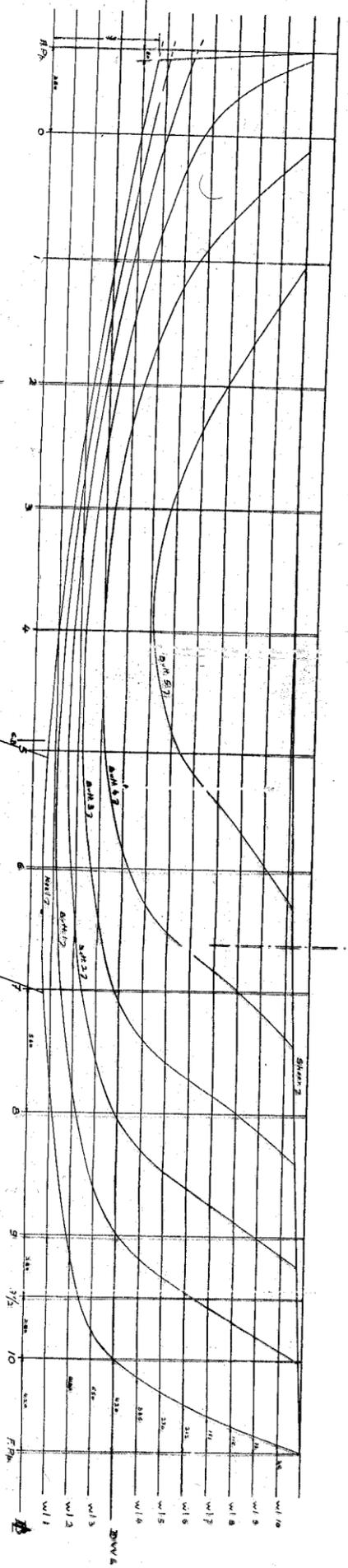


— OFFSET TABLE —

Element	HP	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9 1/2	10	FR
To Keel	470	400	308	225	155	100	64	50	65	110	184	240	400	—
Sheer	1100	1100	1100	1100	1100	1094	1085	1117	1112	1143	1161	1171	1182	1200
Beam #1	519	443	389	282	181	135	114	111	144	217	410	737	1171	—
#2	629	512	380	265	175	120	105	178	238	365	591	—	—	—
#3	—	667	485	340	262	221	214	262	380	508	—	—	—	—
#4	—	—	665	448	339	300	319	427	505	—	—	—	—	—
#5	—	—	—	800	578	512	634	1013	—	—	—	—	—	—
To Sheer	580	723	993	1480	2206	3210	4547	6347	8823	12164	16644	22832	30000	—
W/L 1	—	—	—	—	—	—	15	164	54	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	311	538	460	322	170	20	—	—
3	—	—	—	—	—	—	454	765	800	770	617	419	124	39
W/L	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
To W/L	579	734	927	1208	1735	2485	3547	5023	6947	9350	12300	16800	22800	—
B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Table to measure in millimet.

51007 217



L. O. R. 6400 m
 L. V. L. 5000 m
 S. m. a. 3400 m
 D. m. 1865 m
 Displac. 1100 Mg
 S. m. R. 33.0 m

LARCH
IRM

NOZIONI DI IDROSTATICA

I SOLIDI E I FLUIDI

La materia può reagire in modo diverso all' azione delle forze che la cimentano, pertanto applicando un sistema di forze ad un corpo materiale si possono distinguere i seguenti comportamenti:

- la forma originaria si modifica, anche se in misura limitata, ma si ripristina quando il sistema di forze viene rimosso; in tale caso il comportamento è elastico e la materia costituisce un corpo solido;
- la forma originaria si modifica, in misura più o meno vistosa e non si ripristina quando il sistema di forze viene rimosso; in tale caso il comportamento è plastico e la materia costituisce un corpo plastico;
- la forma originaria si modifica, in misura vistosa anche per forze esigue; il comportamento è come quello di un solido solo se il sistema di forze è di pura compressione (comportamento elastico); si hanno scorrimenti se il sistema di forze non è di compressione; in tal caso il comportamento è scorrevole e la materia costituisce un corpo fluido.

Il corpo rigido è una astrazione che considera il corpo solido indeformabile ai fini pratici e così noi considereremo un solido galleggiante in tutto il presente lavoro.

Il diverso comportamento tra i solidi ed i fluidi è dovuto alle diverse caratteristiche del loro stato di aggregazione molecolare.

Nei solidi la disposizione delle molecole è praticamente invariabile e pertanto i solidi sono caratterizzati da una forma e da un volume invariabili.

Nei fluidi la struttura molecolare è disordinata e variabile sotto l'azione di forze anche piccole, pertanto essi sono scorrevoli. I fluidi si dividono in due categorie: i liquidi ed i gas. I liquidi, pur consentendo il movimento delle molecole, mantengono invariata la distanza tra esse, ciò comporta che un liquido cambia di forma al cambiare del recipiente che lo contiene, ma conserva il valore del volume.

I gas hanno legami molecolari molto labili per cui tendono ad occupare il massimo volume disponibile, ciò comporta che un gas cambia forma al cambiare del recipiente che lo contiene e ne occupa tutto il volume.

Un corpo solido può galleggiare in un fluido e poiché le navi sono realizzate per galleggiare in acqua (di mare, di fiume o di lago) si espongono alcune definizioni e proprietà fisiche generali dei fluidi e si forniscono i valori relativi al fluido acqua.

L'acqua

Il composto chimico avente formula H_2O si chiama acqua. L'acqua allo stato puro è ricavabile solo per distillazione, ma correntemente si indicano con il nome di acqua tutti quei miscugli o soluzioni naturali che hanno come componente principale preponderante il composto chimico H_2O ma che contiene sali disciolti, solidi in sospensione, gas liberi o disciolti, ecc., pertanto si parla di acqua sorgiva, acqua di fiume, di lago, di mare, ecc.

L'acqua di mare

La più grande riserva naturale di acqua è rappresentata dal mare che ricopre circa il 73% della superficie terrestre per un volume stimato in circa 1.8 miliardi di chilometri cubi. Gli elementi presenti nell'acqua di mare vengono suddivisi in:

- costituenti maggiori come Sodio, Cloro, Magnesio, Calcio e Potassio; presenti sotto forma di sali e rappresentano circa il 99,95% del peso totale degli elementi presenti;
- costituenti intermedi come Ossigeno, Stronzio, Silicio, Fluoro, Argon, Azoto, Fosforo e Iodio;
- micro-costituenti, come tutti gli altri elementi anche se in percentuali infinitesimi.

La salinità

La salinità dell'acqua di mare è costituita dai soli costituenti maggiori e si esprime in grammi di sale per chilogrammo di acqua (quindi in per mille). Escluse le zone costiere, il rapporto tra i diversi costituenti maggiori è costante per cui nota la concentrazione di uno è determinabile quella degli altri. Il sale più presente è il cloruro di sodio (NaCl) che rappresenta l'85.7% del totale dei sali, seguono i cloruri di potassio, magnesio e calcio.

La salinità varia da mare a mare ed ha i seguenti valori medi:

• mare Rosso	38.80
• mare del Golfo Persico	36.70
• mare dei Caraibi	35.95
• mare della California	35.50
• oceano Atlantico	35.37
• oceano Pacifico	34.91
• mare Mediterraneo	34.85
• oceano Indiano	34.81
• mare del Nord	34.20
• mare del Giappone	34.10
• mare dell' Australia	33.87
• mare della Cina	32.10
• mare di Bering	30.30
• mare Artico	25.50

In ingegneria navale si assume per la salinità il valore convenzionale $s=35.00$ per cui si assume che in un chilogrammo di acqua di mare vi siano 30 grammi (85.7 % di cloruro di sodio e 5 grammi (14.3 %) di tutti gli altri sali con costituenti maggiori.

SISTEMI ED UNITA DI MISURA.

Si ricorda che è obbligatorio il Sistema Internazionale (S.I.) di misura che ha sostituito il Sistema Pratico o Sistema Tecnico che assumeva come grandezze e unità fondamentali

- la forza F con unità di misura il Kgp (chilogrammo peso),
- la lunghezza L con unità di misura il m (metro),
- il tempo T con unità di misura il s (secondo).

Il Sistema Internazionale adotta come grandezze ed unità fondamentali

- la massa M con unità di misura il kg (chilogrammo massa),
 - la lunghezza L con unità di misura il m (metro),
 - il tempo T con unità di misura il s (secondo),
- pertanto la forza è una grandezza derivata, con unità di misura chiamata newton (N), definita come la forza che imprime ad un corpo con massa di 1 kg l'accelerazione di 1m/s^2 .

Pertanto si ha che

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2.$$

Se si accetta per l'accelerazione di gravità il valore medio $g = 9.8066 \text{ m/s}^2$ si ha

$$1 \text{ kgp} = 1 \text{ kg } 9.8066 \text{ m/s}^2 = 9.8066 \text{ N}$$

I vantaggi del sistema tecnico si conservano in quello internazionale introducendo l'unità di forza accanto alle tre fondamentali e cioè:

- la massa M con unità di misura il kg (chilogrammomassa),
- la lunghezza L con unità di misura il m (metro),
- il tempo T con unità di misura il s (secondo),
- la forza F con unità di misura il N (newton).

Tra le grandezze derivate, hanno particolare importanza nel presente lavoro il peso specifico, la densità e la pressione.

E' detta pressione la grandezza fisica che esprime l'intensità della forza normale applicata uniformemente su una superficie unitaria. Pertanto:

nel sistema tecnico:

$$[p] = F/L^2 \text{ si misura in kgp/m}^2$$

nel sistema internazionale:

$$[p] = M L T^{-2}/L^2 \text{ si misura in N/m}^2$$

Alla grandezza 1 N/m^2 si dà il nome di pascal per cui è $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

Unità da questa derivata è il bar: $1 \text{ bar} = 100000 \text{ N/m}^2 = 100000 \text{ Pa}$.

Come unità di misura della pressione è ammessa anche la atmosfera normale(atm) così definita

$$1 \text{ atm} = 10332.3 \text{ kgp/m}^2 = 101325.0 \text{ Pa}$$

Si ricorda, infine, che la pressione di una colonna di acqua di mare (a 15°C e con salinità standard) alta 10 m è pari a circa 1 atm.

Densità e peso specifico

Nella meccanica la materia viene concepita come mezzo continuo, pertanto le sue proprietà sono funzioni continue nello spazio. Si consideri un volume elementare dV che racchiude il punto Q di massa fluida; siano dm e dP la massa ed il peso di detto volume.

Detta g l'accelerazione di gravità si definiscono le seguenti caratteristiche fisiche del fluido nel punto Q :

$$\text{densità} \quad \rho = \lim_{dV \rightarrow 0} dm/dV$$

definisce la massa dell'unità di volume

$$\text{peso specifico} \quad \gamma = \lim_{dV \rightarrow 0} dP/dV = g \rho$$

definisce il peso dell'unità di volume

Nella massa fluida, quindi e in generale, si avrà una distribuzione continua in funzione del punto considerato della densità e del peso specifico.

In particolare il peso specifico dipende dall'accelerazione di gravità g che alla latitudine

di 45° ed al livello del mare è pari a 9.8066 m/s².

Nel sistema pratico il valore del peso specifico dell'acqua distillata ($s=0$) a temperatura di 4°C e per $g=9.8066 \text{ m/s}^2$ è fissato come segue:

$$\gamma = 1000 \text{ kgp / m}^3$$

mentre nel Sistema Internazionale si ha:

$$\gamma = 9806.6 \text{ N/m}^3$$

Nella tabella seguente vengono riportati i valori della densità e del peso specifico dell'acqua di mare con salinità standard ($s=35$) a diversa temperatura

Leggi della idrostatica

L'Idrostatica è quella parte della Meccanica che studia i liquidi in riposo. I primi studi sulla statica dei liquidi risalgono ad ARCHIMEDE che, nel 3° secolo avanti Cristo, nei suoi scritti è stata rilevata la seguente affermazione:

“il liquido ha una natura tale che ogni sua parte meno premuta è spostata da quella più premuta e che ciascuna parte è premuta perpendicolarmente dal liquido superiore a meno che esso non sia chiuso da qualche parte o premuto da qualche altra cosa.”

L'analisi attenta di tale testo porta ad affermare che Archimede non aveva chiaro il concetto di pressione, ma lo aveva intuito come aveva intuito il concetto di peso specifico; si racconta che Archimede intuì il concetto di peso specifico mentre era ai bagni pubblici e rifletteva sul come risolvere il sospetto di Gerone II (306-215 a.C.) circa la composizione (solo oro o mista ad argento) di una corona regalatagli.

La genialità di Archimede fu veramente grande, infatti dovettero trascorrere molti secoli prima che con Simon STEVIN (1548-1620) e con Blaise PASCAL (1623-1662) l'idrostatica ricevesse decisivi contributi.

La legge di STEVIN può essere così sintetizzata:

in un liquido pesante ogni strato orizzontale è sottoposto ad una pressione il cui valore è dato dal prodotto del peso specifico per il dislivello tra lo strato considerato e la superficie libera del liquido.

La legge di PASCAL può essere enunciata in uno dei seguenti modi :

in un fluido incompressibile e in equilibrio le pressioni si trasmettono inalterate in tutte le direzioni,

in un fluido incompressibile e in equilibrio la pressione su tutti gli elementi superficiali che passano per un medesimo punto è la stessa, qualunque sia la giacitura di tali elementi superficiali,

in un fluido incompressibile in equilibrio in un campo conservativo (ad esempio il campo gravitazionale) un aumento di pressione in un punto della massa fluida, restando invariato il campo di forze e supposte inalterate le condizioni di equilibrio, provoca un uguale aumento di pressione in tutti gli altri punti,

L'enunciato precedente va quindi così generalizzato:

in un liquido pesante, posto in un recipiente di qualsiasi forma, ogni strato orizzontale è sottoposto ad una pressione il cui valore è dato dal prodotto del peso specifico del liquido per l'altezza della colonna liquida sovrastante. Tale enunciato è perfettamente equivalente a quello già dato all'inizio del presente paragrafo, come legge di Stevin .

E' classica l'esperienza eseguita con una botte piena d'acqua sulla cui superficie superiore è innestato a tenuta, un tubo di piccolo diametro ma molto lungo. Versando nel tubo una piccola quantità di acqua (quindi un peso trascurabile rispetto a quello relativo all'acqua già contenuta nella botte), ma in grado di riempire il tubo fino a un certo livello

(dell'ordine di alcuni metri) si vede scoppiare la botte stante la notevole pressione ($p = \gamma \cdot h$) alla quale le pareti della botte vengono sottoposte.

Il diagramma delle pressioni lungo una generica verticale è di forma trapezoidale avente

per altezza h_0 , per base superiore p_a e per base inferiore $p_a + \gamma h_0$. (Fig.1). Se si prescinde dalla pressione atmosferica il diagramma diventa triangolare e la pressione $p = \gamma z$ è detta pressione idrostatica (anche se il fluido incomprimibile non è acqua).

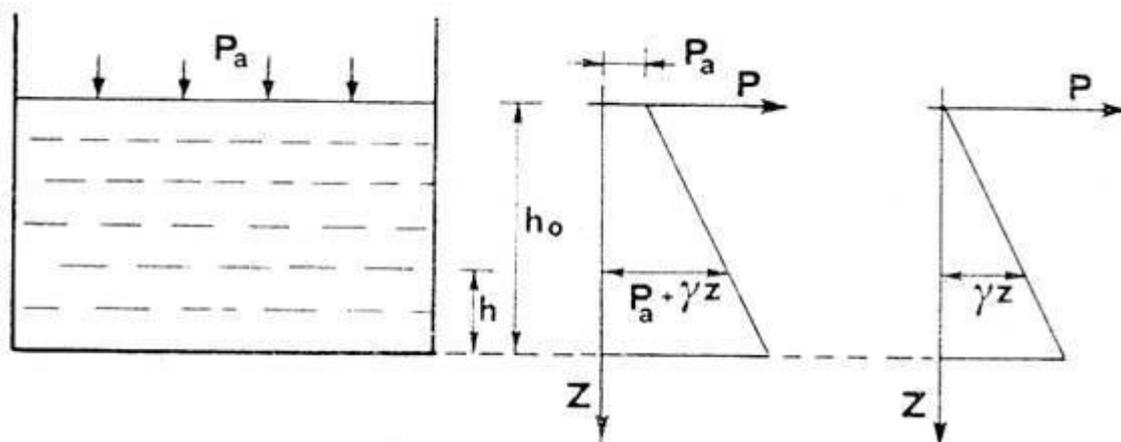


Fig.1

In un recipiente (figura 2) che presenti più superfici libere, il liquido si dispone nei diversi vani comunicanti, alla stessa quota in quanto su ciascuna superficie libera grava la stessa pressione (quella atmosferica). Tale enunciato costituisce il principio dei vasi comunicanti.

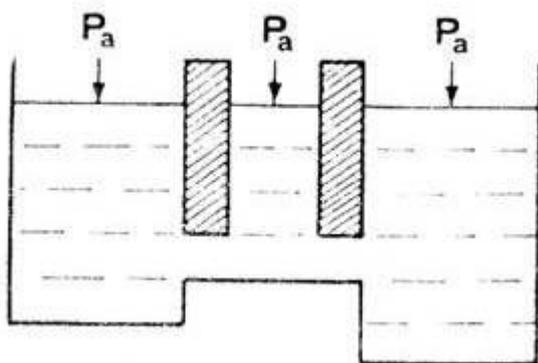


Fig.2

Da quanto fino ad ora esposto è facile tracciare il diagramma delle pressioni esercitate dal liquido sulle pareti di un recipiente.

Con riferimento alle figure 3 ed 4, sulle pareti laterali il diagramma delle pressioni ha forma triangolare, la pressione idrostatica è 0 in corrispondenza della superficie libera

mentre ha il valore γh_0 in corrispondenza del fondo; sulla parete del fondo il diagramma delle pressioni ha forma rettangolare, la pressione idrostatica è in ogni punto pari a γh_0 .

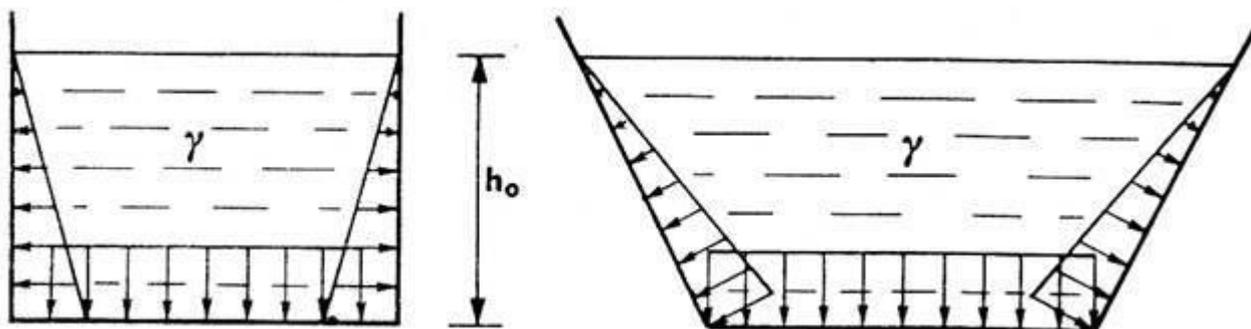


Fig.3a Fig.3b

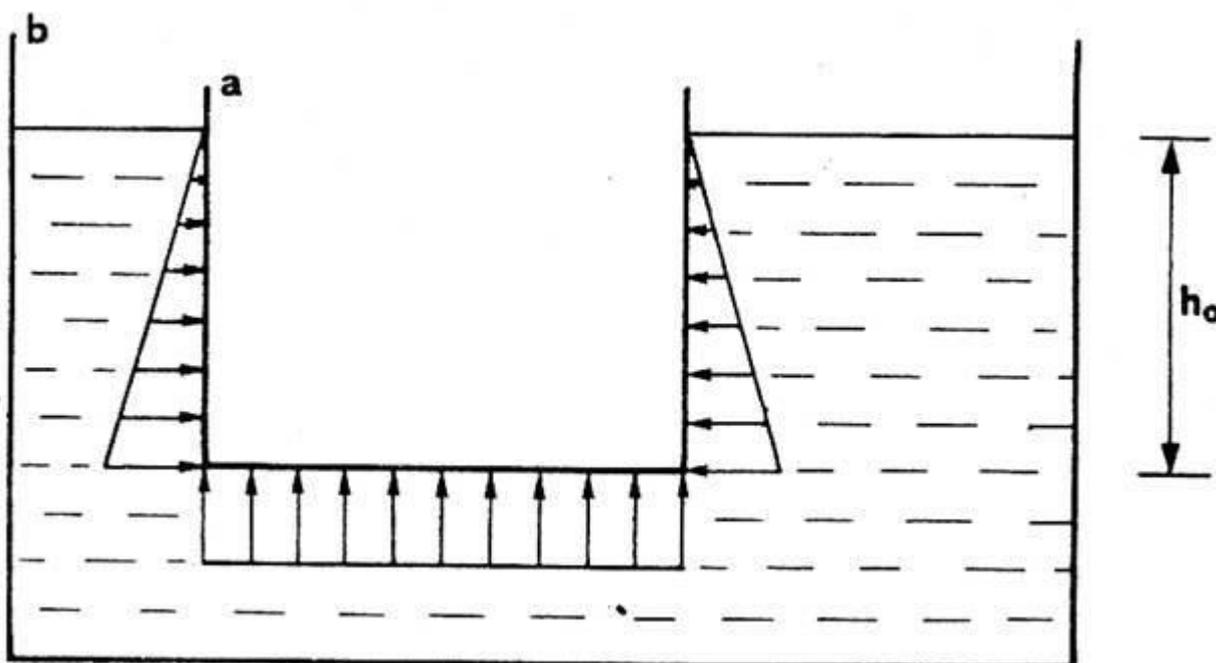


Fig.4

Se un contenitore "a" è immerso per un'altezza h_0 nel liquido contenuto nel recipiente "b", il diagramma delle pressioni idrostatiche che si esercitano sulle pareti del contenitore "a" è quello rappresentato in figura 4. Se il liquido (o il peso specifico), l'altezza h_0 e l'area A del fondo del contenitore "a" sono gli stessi di quelli del caso precedente (figura 3a), allora i due casi (figure 3a e 4) presentano uguale, ma di segno opposto, diagramma delle pressioni idrostatiche ed anche la forza risultante F sui due fondi sono uguali in intensità, ma di segno opposto. Tale situazione prescinde dalla forma e dimensioni del contenitore "b" e dalla distanza tra le pareti dei due contenitori.

Per una nave a fondo piatto, quindi, il fasciame delle murate della carena è sottoposto ad una distribuzione triangolare delle pressioni idrostatiche, mentre il fondo è sottoposto ad una distribuzione rettangolare delle stesse pressioni.

Un sottomarino a sezioni circolari ed a profondità di z metri è sottoposto a pressioni idrostatiche (radiali) variabili linearmente dal valore γz al valore $\gamma(z+d)$ essendo d il diametro.

Le paratie di un compartimento (stiva) contenente liquido sono sottoposte a una distribuzione triangolare delle pressioni idrostatiche, mentre il fondo è sottoposto ad una distribuzione rettangolare delle stesse pressioni

Dimostrazione della legge di Archimede

Consideriamo un corpo chiuso, rigido ed impermeabile di peso D liberamente galleggiante in un liquido omogeneo ed in quiete. La figura 5a riporta una sezione retta di tale corpo. Il piano di galleggiamento di equilibrio abbia traccia WL ,

Sia S la superficie del corpo a contatto con il liquido e B il centro di carena. Consideriamo una terna ortogonale con origine in B ed asse Z verticale. Asportiamo ora il corpo dal liquido e consideriamo il volume \tilde{N} di liquido che occupa adesso lo spazio che prima era occupato dalla carena, come mostra la figura 5b

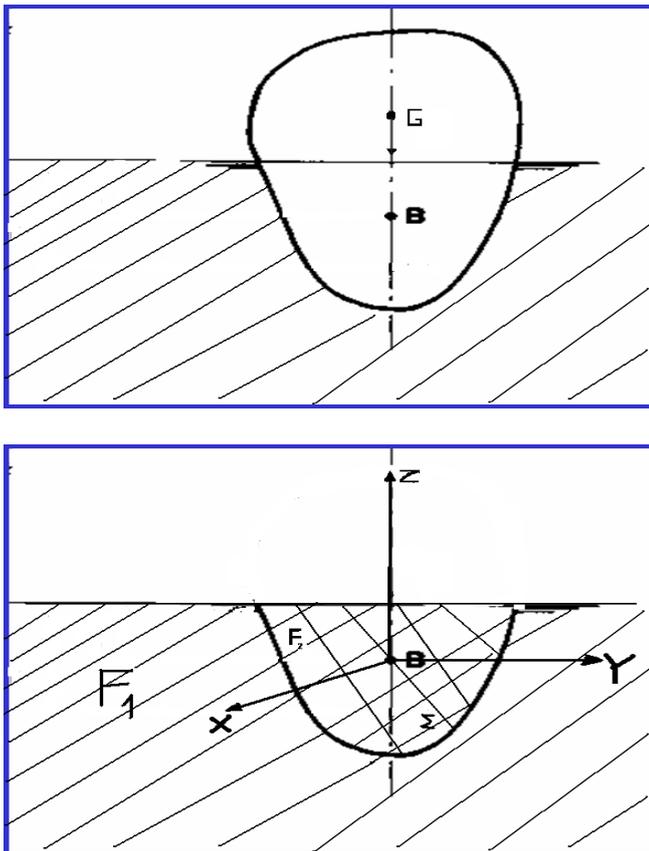


Fig.5b

L'insieme liquido F è quindi costituito da due parti: quella F_1 , esterna alla frontiera S e quella F_2 , interna alla stessa. Il volume \tilde{N} di liquido F_2 ha peso $P=\gamma\tilde{N}$ (e, quindi, è una forza verticale diretta verso il basso) applicato nel baricentro B del volume \tilde{N} e tale peso grava

sulla parte F1, di fluido. Sulla frontiera S (che è in quiete perché il fluido F è stato assunto tale) la parte F1, agirà su quella F2 attraverso un sistema di forze elementari la cui risultante sia S; consideriamo le componenti, secondo i tre assi coordinati, di tale risultante.

La componente S_x deve essere nulla altrimenti il volume \tilde{N} di liquido F2 traslerebbe secondo la direzione di X, mentre invece è e deve restare in quiete. Analogamente per S_y . La componente S_z deve essere uguale a P e deve avere la stessa direzione e verso opposto al vettore P altrimenti si avrebbe la traslazione verso l'alto o verso il basso del volume \tilde{N} di liquido F2, il che è contro l'ipotesi di liquido in quiete. Si ha allora che la S_z coincide con la risultante S delle forze elementari agenti sulla frontiera S ed è, quindi:

$$S = P = g\tilde{N} = D$$

che è appunto la legge di Archimede che si voleva dimostrare, la quale afferma che:

un corpo omogeneo, posto in un liquido in quiete, riceve una forza verticale, detta spinta, diretta, dal basso verso l'alto ed uguale al peso del volume di liquido spostato dal corpo.

Il principio di Archimede resta valido anche se non si tratta di liquidi ma più in generale, di fluidi. Se il corpo è immerso in un gas, la spinta che riceve è detta aerostatica. Un caso particolare è costituito dai palloni aerostatici i quali non sono corpi rigidi, ma hanno un involucro elastico che contiene un gas di peso specifico molto inferiore a quello dell'aria: generalmente idrogeno o elio. Immerso nell'aria, il pallone, per la legge di Archimede, è sottoposto ad una spinta diretta verso l'alto pari al peso del volume di aria che sposta. A mano a mano che il pallone sale, la pressione esterna diminuisce (a causa della variazione di densità dell'aria con la quota) per cui il gas interno ha la possibilità di espandersi facendo aumentare il volume del pallone grazie all'elasticità dell'involucro stesso. L'azione combinata di queste due cause produce l'effetto di ridurre lentamente la spinta aerostatica. Ad una certa altezza la spinta aerostatica risulta pari al peso del pallone per cui questo non sale più. Se gli uomini che sono nella navicella vogliono ancora salire dovranno ridurre il peso del complesso scaricando zavorra (di solito sacchetti di sabbia); al contrario, per scendere, è necessario aprire una valvola e fare sfuggire gas dal pallone, in quanto, in tale modo, il volume del pallone diminuisce riducendo la spinta aerostatica.

STATICA DELLA NAVE

Equilibrio dei corpi

Dalla statica dei corpi rigidi sappiamo che condizione necessaria e sufficiente affinché un corpo sia in equilibrio è che:

- la sommatoria delle forze agenti sul corpo sia nulla;
- la sommatoria dei momenti di dette forze rispetto ad un polo sia nulla.

Su un corpo totalmente o parzialmente immerso agiscono due sole forze:

- la forza peso del corpo detta dislocamento, pari alla somma di tutti i pesi interni, diretta verticalmente verso il basso ed applicata nel centro di gravità (G);
- la spinta idrostatica diretta verticalmente verso l'alto e passante per il centro di carena (B).

Tale spinta è nota, secondo il Principio di Archimede, conoscendo il volume immerso del corpo in esame, infatti :

“Un corpo totalmente o parzialmente immerso in un fluido in quiete riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del volume del liquido spostato”.

$$S = \nabla \omega$$

dove:

∇ = Volume del liquido spostato

S = Spinta

ω = Peso specifico del liquido (1,026 t/m³ per acqua di mare a 15°C e condizioni standard di salinità)

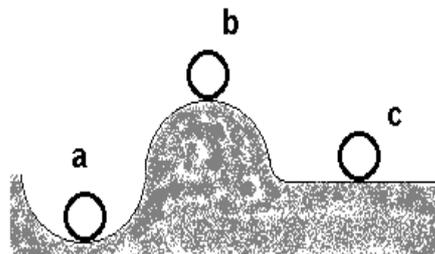
Sono così individuate intensità, direzione e verso della spinta ricevuta dal corpo, ma non il CENTRO DI SPINTA che è il suo punto di applicazione. Essendo questo punto di difficile determinazione e di scarsa applicazione pratica, in Architettura navale si preferisce definire un altro punto, il CENTRO DI CARENA (baricentro del volume dell'opera viva) per il quale passa la retta d'azione della spinta e le cui coordinate sono facilmente individuabili.

Affinché siano quindi verificate le condizioni di equilibrio prima indicate, occorre che peso e spinta:

- abbiano lo stesso valore (modulo) e verso opposto ($\Sigma F = 0$)
- giacciono sulla stessa retta d'azione ($\Sigma M = 0$)

Oltre alle condizioni generali di equilibrio, dovranno essere soddisfatte anche le condizioni di stabilità; sappiamo infatti che esistono tre condizioni di equilibrio per un corpo qualsiasi:

- EQUILIBRIO STABILE (a)
- EQUILIBRIO INSTABILE (b)



)
 - EQUILIBRIO INDIFFERENTE (c)

STABILE: quando, perturbando il sistema in modo da spostare il corpo dalla posizione iniziale di una piccola quantità, la risultante delle forze applicate è tale da riportare il corpo nella configurazione originaria, al cessare della causa perturbatrice.

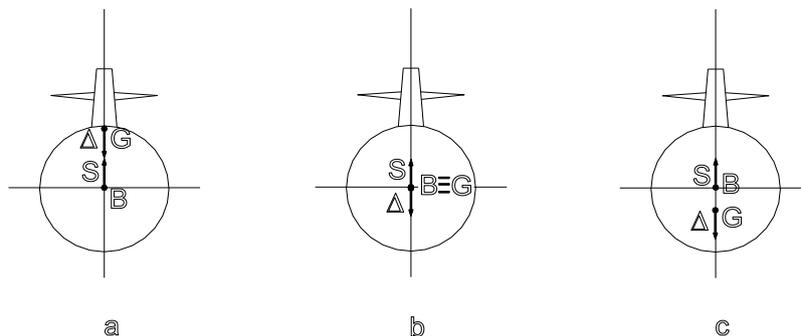
INSTABILE quando, spostando il corpo dalla posizione iniziale di una piccola quantità, al cessare della causa perturbatrice, le forze agenti tendono ad allontanare il sistema dalla configurazione iniziale di equilibrio in modo irreversibile.

INDIFFERENTE quando il sistema non risente della causa perturbante e qualsiasi posizione è di equilibrio. Stabilite le condizioni iniziali di equilibrio, verificheremo le condizioni di stabilità nei due casi di corpo parzialmente immerso o galleggiante e di corpo totalmente immerso.

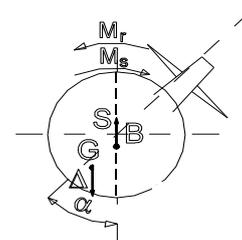
Corpi totalmente immersi

Se il peso (Δ) è uguale alla spinta (S) ed ambedue giacciono sulla stessa retta d'azione il corpo è in equilibrio.

Possono verificarsi tre condizioni di equilibrio a seconda della reciproca posizione del baricentro e del centro di carena.



E' verificabile che se il corpo viene allontanato per una causa esterna dalla posizione iniziale di equilibrio e inclinato trasversalmente, la sola condizione di stabilità è che il baricentro sia sotto al centro di carena (c), infatti è l'unica situazione in cui, al cessare della causa perturbatrice, il corpo tenderà a ritornare nella condizione iniziale grazie alla nascita di un momento raddrizzante tra spinta e peso.



Corpi parzialmente immersi

La sostanziale differenza nei riguardi dell'equilibrio fra corpi totalmente immersi (ad esempio sommergibili in immersione) e corpi parzialmente immersi (ad esempio navi), è che nei primi la posizione del centro di carena non varia al variare dell'inclinazione del corpo, mentre nei secondi, la posizione del centro di carena, ossia del punto per il quale passa la linea di azione della spinta, varia al variare della posizione o dell'inclinazione del corpo stesso.

Il centro di gravità della nave, indicato nei disegni con la lettera G, è il baricentro dei pesi che costituiscono la nave stessa. In genere il centro di gravità di una nave si trova sul piano longitudinale di simmetria ad una altezza di poco maggiore della metà dell'altezza dello scafo e leggermente spostato a poppavia della mezzeria.

Come il centro di gravità, anche il centro di carena di una nave galleggiante in posizione diritta ed in equilibrio si trova sul piano longitudinale di simmetria, in quanto la spinta è simmetricamente distribuita sui due lati della carena.

Poiché l'acqua spostata si trova tutta al di sotto del piano di galleggiamento, con le consuete forme di carena, il centro di carena B si trova poco sopra la metà dell'immersione, quindi in posizione sensibilmente inferiore al baricentro G.

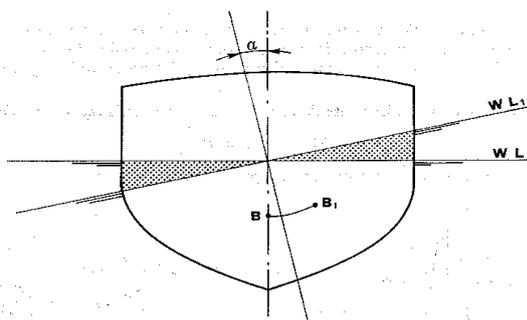
La forza peso della nave è applicata nel centro di gravità mentre la spinta passa per il centro di carena. Queste due forze sono sempre dirette verticalmente ed hanno verso contrario. Affinché la nave sia in equilibrio, esse devono risultare uguali in modulo ed avere la stessa linea d'azione.

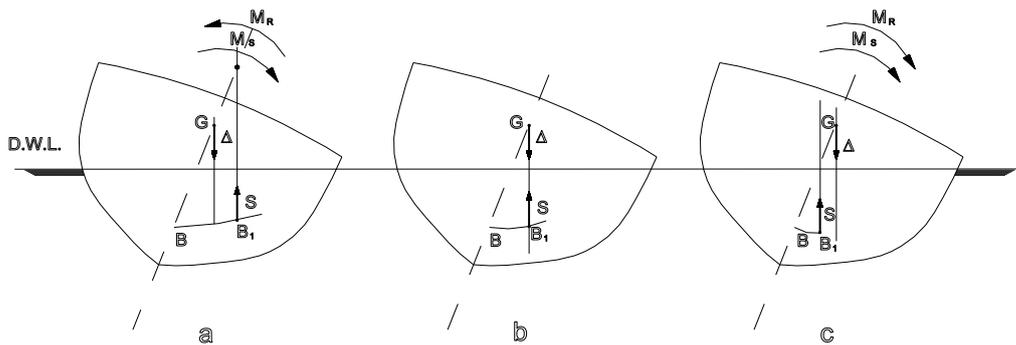
Incliniamo trasversalmente la nave, mediante una causa esterna, di un angolo generico α ; la sua nuova posizione sia quella indicata in figura 3.15 .

Dato che il dislocamento non è cambiato, la nuova carena, individuata dal piano WL_1 , ha lo stesso volume della carena individuata dal piano WL, ma la sua forma è evidentemente diversa. Le due carene si dicono *ISOCARENE*, cioè carene di uguale volume. L'inclinazione avvenuta si chiama *ISOCARENICA*.

Data la forma delle due carene, mentre il centro di volume, ossia il centro di carena, della carena iniziale si trova in B, il centro della nuova carena dopo l'inclinazione si sarà spostato, verso dritta e verso l'alto nel punto B_1 e sarà uscito dal piano del disegno a causa delle diversità di forme di prora e di poppa.

Una nave in posizione diritta è in equilibrio stabile quando, spostata dalla sua posizione iniziale diritta, origina una coppia di forze che tendono a riportarla nella posizione iniziale.





Se il centro di carena si è spostato in B_1 , la coppia di stabilità dovuta alle forze Δ ed S ha un effetto raddrizzante e quindi l'equilibrio della nave si dice *STABILE* (figura 3.16a), oppure può avere un effetto ulteriormente sbandante e quindi l'equilibrio si dice *INSTABILE* (figura 3.16c). Nel caso che peso e spinta abbiano la stessa linea d'azione siamo nel caso di equilibrio indifferente (figura 3.16b), caso comunque puramente teorico. Risulta evidente che, a parità di posizione di G , la stabilità dell'equilibrio di una nave e la reazione che essa oppone ad essere allontanata dalla sua posizione iniziale diritta, dipendono dallo spostamento laterale del centro di carena, determinato dal cambiamento di forma conseguente all'avvenuta inclinazione, cioè in definitiva dalla forma di carena.

Stabilità trasversale per piccole inclinazioni

Consideriamo ora una nave che sia in equilibrio stabile nella posizione iniziale diritta come devono essere normalmente tutte le navi, e diamole un'inclinazione isocarenica di un angolo α . Per le considerazioni già fatte, il centro di carena B si sposta in B_1 e la nuova linea d'azione della spinta $\overline{B_1M}$ incontrerà la linea d'azione della spinta iniziale \overline{BM} nel punto M . Il punto M si chiama *METACENTRO TRASVERSALE* relativo al volume di carena V . Se l'angolo di inclinazione è di piccola entità ($<10^\circ$) si può ammettere, con sufficiente approssimazione, che la curva descritta dal centro di carena, nel passare da B a B_1 , sia un arco di circonferenza e che tutte le successive linee d'azione delle spinte relative ai centri di carena da B a B_1 passino per il punto M che rappresenta quindi il centro di curvatura della curva descritta da B .

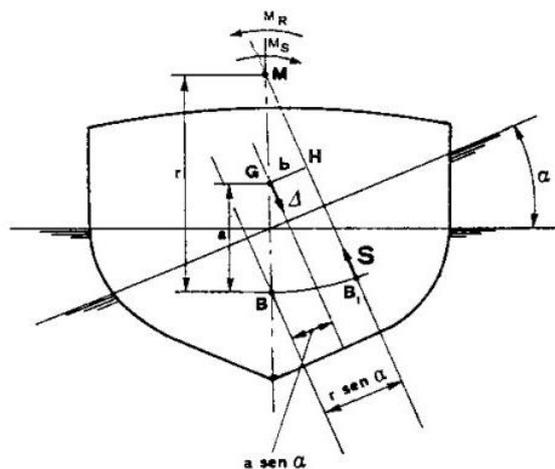


Fig. 0.1

Con tale definizione risulta evidente che, affinché la nave in posizione diritta sia in equilibrio stabile, è necessario che M si trovi al disopra di G . Infatti in tale caso la coppia che si determinerà per un piccolo angolo di inclinazione della nave sarà positiva e tenderà a riportare la nave nella sua posizione iniziale diritta. Se chiamiamo " r " il *RAGGIO METACENTRICO TRASVERSALE* \overline{BM} ed " a " la misura del segmento \overline{BG} , cioè la sovrelevazione del baricentro sul centro di carena a nave diritta, si definisce *ALTEZZA METACENTRICA TRASVERSALE INIZIALE* il segmento $(r-a)$, che in definitiva rappresenta la distanza tra il metacentro ed il centro di gravità. Il momento della coppia di stabilità trasversale, considerando il triangolo rettangolo MGH vale:

$$M_{\alpha} = \Delta \cdot b = \Delta \cdot \overline{GH} = \Delta \cdot \overline{GM} \sin \alpha$$

cioè:

$$M_{\alpha} = \Delta(r - a) \sin \alpha$$

Il valore di (r-a) si chiama anche *INDICE DI STABILITA' INIZIALE* e dà un'idea della capacità della nave a reagire a cause sbandanti esterne nell'intorno della sua posizione dritta.

Un valore elevato di (r-a) sarebbe perciò consigliabile per la stabilità, soprattutto per le navi militari. D'altra parte, un valore troppo elevato di (r-a), se va bene in mare tranquillo, rende la nave eccessivamente "dura" in acqua agitata, tendendo la nave a mantenere i ponti paralleli al profilo dell'onda (in gergo marinaro "cavalca l'onda") causando continui movimenti ed accelerazioni trasversali e longitudinali. Tali accelerazioni, oltre che essere dannose per il "benessere" e quindi l'operatività dell'equipaggio, possono ostacolare il corretto funzionamento delle apparecchiature installate a bordo. Nel caso che il valore (r-a) sia basso, sarà meno stabile, ma si comporterà meglio in mare agitato (in gergo "taglia l'onda") e si dirà "nave cedevole".

Pertanto i valori adottati di (r-a) per i vari tipi di navi sono i risultati di un compromesso tra le varie necessità.

I valori medi dell'altezza metacentrica possono essere, orientativamente:

- Navi militari 0.8...1.2 m
- Velieri 0.6...0.8 m
- barche a vela 2.0...2.5 m
- motosailer 0.6...0.8 m
- scafi plananti 0.3...0.6 m

Determinazione dei raggi metacentrici trasversale e longitudinale di carena di una nave.

Le espressioni che consentono di calcolare i raggi metacentrici trasversale e longitudinale di carena e, quindi, di ubicare - nota la posizione del centro di carena B - i metacentri trasversale e longitudinale, sono:

$$BM = r = \frac{I_x}{\nabla} \quad (3)$$

$$BM_L = R = \frac{I_y}{\nabla} \quad (4)$$

Alla (3) si perviene nel modo seguente. Si consideri la sezione trasversale di una nave il cui galleggiamento dritto di equilibrio W.L. individui la carena di volume ∇ e centro B (fig. A. 1). Tale sezione è quella contenente il baricentro G della nave ed il centro B di carena. Consideriamo poi lo stesso galleggiante inclinato trasversalmente di un angolo infinitesimo $d\varphi$ in modo isocarenico (le due carene hanno uguale volume ∇).

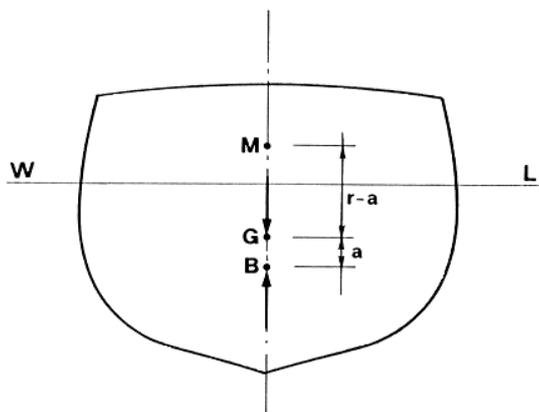


Fig. A. 1

La nuova posizione è presentata nella fig. A. 2¹ nella quale sono anche segnati gli elementi relativi alla carena dritta (quella iniziale). Rispetto alla precedente carena, la nuova ha in più il menisco di immersione (in figura rappresentato da LOL') avente volume $d\nabla_i$, e baricentro I ed in meno in menisco di emersione (in figura rappresentato da WOW') avente volume $d\nabla_e$ e baricentro E. Poiché i due galleggianti sono isocarenici, i menischi hanno uguale volume: $d\nabla_i = d\nabla_e = d\nabla$

$$\nabla' = \nabla + d\nabla_i - d\nabla_e = \nabla \quad \Rightarrow$$

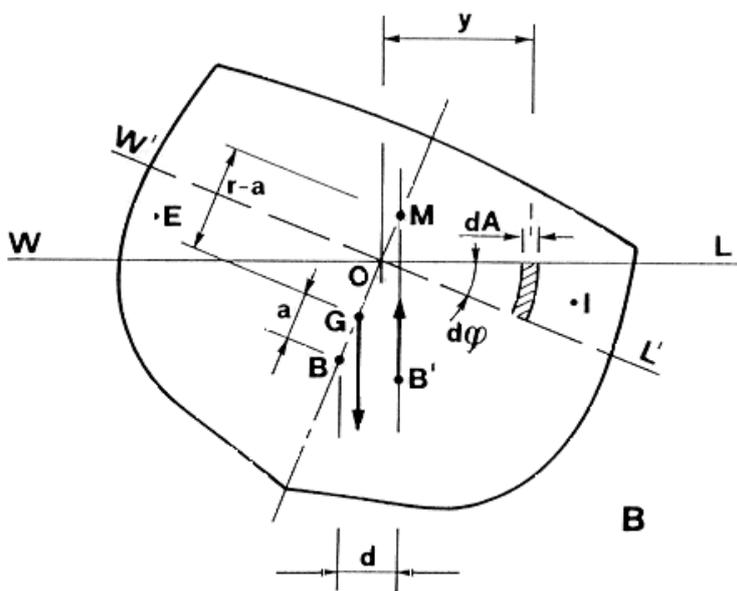


Fig. A. 2

Lo spostamento del centro di carena da B a B' è dipendente dallo spostamento del volume del menisco da quello di emersione a quello di immersione. Nel baricentro I del menisco di immersione può ritenersi applicata la forza peso $P_i = \gamma \cdot d\nabla_i = \gamma \cdot d\nabla$ (è una

¹ Per ragioni di chiarezza del disegno l'angolo $d\varphi$ è stato assunto grande e non infinitesimo come deve essere.

forza diretta verso il basso, in quanto relativa ad un volume aggiunto) che produce un momento orario rispetto all'asse di inclinazione x (asse longitudinale della figura di galleggiamento)².

Nel baricentro E del menisco di emersione si può ritenere applicata la forza peso $P_e = \gamma \cdot d\nabla_e = \gamma \cdot d\nabla$ (è una forza diretta verso il l'alto. in quanto relativa ad un volume sottratto) che produce un momento orario rispetto allo stesso asse di inclinazione x.

I due momenti sono uguali e dello stesso segno (tenendo conto del diverso verso di rotazione rispetto ad O traccia dell'asse x sul piano del disegno).

Il momento di ciascun menisco è dato da:

$$M_i = M_e = \int_{\frac{A}{2}} \gamma \cdot d\nabla \cdot y = \int_{\frac{A}{2}} \gamma \cdot y \cdot dA \cdot y \cdot d\varphi = \gamma \cdot d\varphi \int_{\frac{A}{2}} y^2 dA$$

ed il momento totale delle due parti è dato da:

$$M = \gamma \cdot d\varphi \int_A y^2 dA = \gamma \cdot d\varphi \cdot I_x \quad (5)$$

A questo momento deve corrispondere quello determinato dallo spostamento da B a B' del centro di spinta della carena, momento che è pari a

$$M = \gamma \cdot \nabla \cdot d = \gamma \cdot \nabla \cdot BM \cdot d\varphi \quad (6)$$

Dalla eguaglianza delle (5) e (6) si ha allora la (3), c. v. d.:

$$BM = r = \frac{I_x}{\nabla} \quad (3)$$

Se si conosce il centro F della figura di galleggiamento dritto è tracciabile l'asse y ed è possibile ripetere la trattazione giungendo alla (4)³.

Il calcolo dei raggi metacentrici di carena è possibile se si ha a disposizione il piano di costruzione della nave.

² E' uno dei due assi centrali principali d'inerzia della figura di galleggiamento dritto

³ La trattazione svolta nel presente paragrafo a stata riferita alle navi in quanto per esse - e non certo per un galleggiante generico - ha senso parlare di inclinazioni trasversali e longitudinali e, quindi, di metacentri trasversale e longitudinale di carena.

Inoltre l'asse di inclinazione x (quello rispetto al quale il raggio metacentrico assume il valore più piccolo) è immediatamente individuabile per un galleggiamento dritto di una nave in quanto la figura di galleggiamento dritto di una nave è simmetrica proprio rispetto all'asse x, traccia del piano diametrale sul piano di galleggiamento; inoltre, poiché il centro F della figura di galleggiamento dritto è sull'asse di simmetria, l'asse x passerà per il centro F. Ripetendo la trattazione ora fatta per un galleggiante generico non è possibile dare un significato particolare all'asse x o all'asse y per cui si perviene ad un punto μ , detto metacentro (e, quindi ad un segmento $G\mu$ detto altezza metacentrica) il quale, in generale, non coincide con M o con M_L .

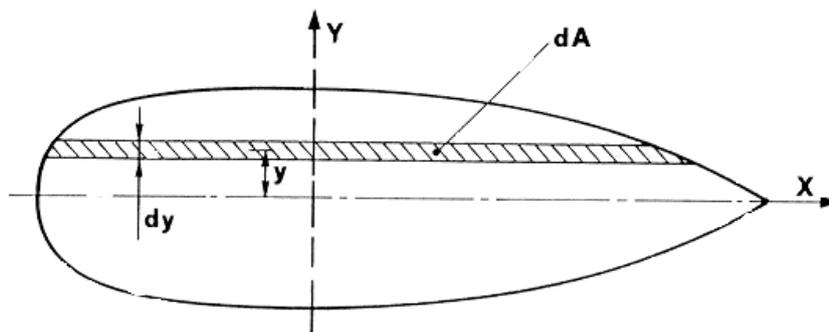


Fig. A. 3

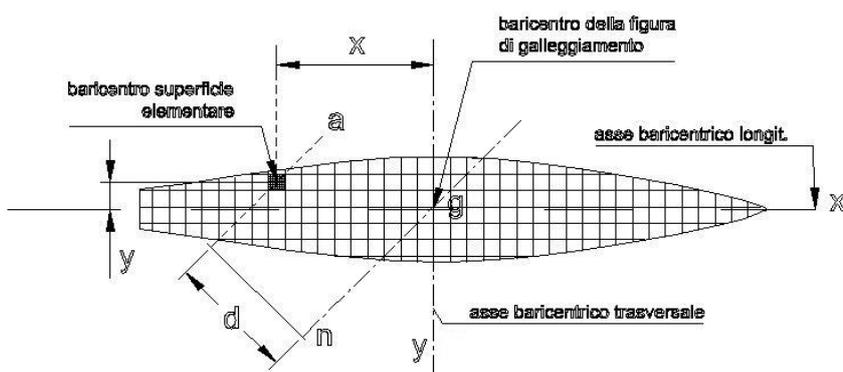
In sintesi la relazione per calcolare il raggio metacentrico trasversale è la seguente:

$$r = \frac{I_x}{V}$$

dove: I_x è il momento d'inerzia della figura di galleggiamento rispetto all'asse baricentrico longitudinale xx . Il momento d'inerzia della figura rispetto all'asse baricentrico x è dato dalla sommatoria dei prodotti delle aree elementari in cui si può scomporre la figura, per il quadrato della distanza dei baricentri di queste aree dall'asse x ;

per cui:

$$I_x = \sum_{i=1}^n a_i y_i^2$$



Stabilità trasversale per inclinazioni superiori a 10°

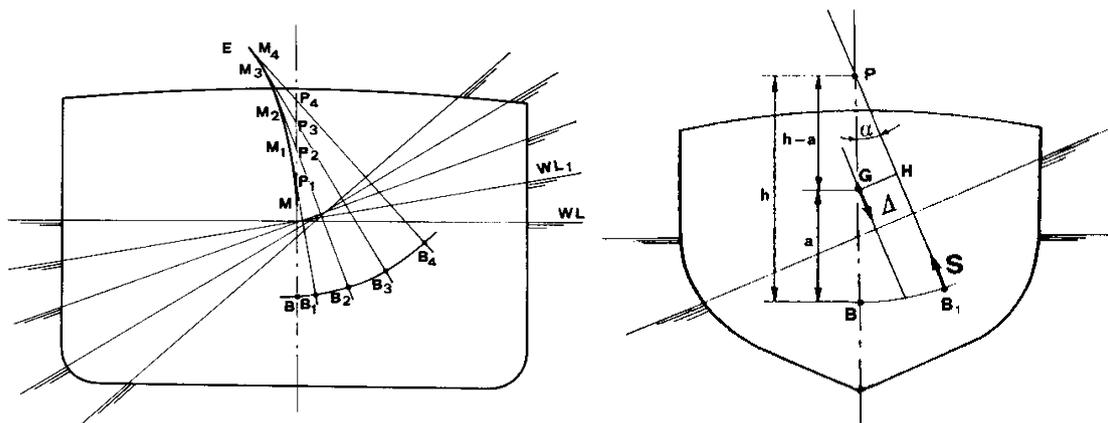
Per angoli di inclinazione $\alpha > 10^\circ$ le considerazioni precedentemente fatte non sono più valide. Infatti la traiettoria dei centri isocarenici di carena non è più assimilabile ad una circonferenza di centro M, ma ad una serie di archi di circonferenza di raggio variabile, rispettivamente di centri M_1, M_2, M_3, \dots

Si può quindi vedere che mentre il centro di carena descrive la **traiettoria dei centri isocarenici di carena** (B_0, B_1, B_2, \dots) i relativi metacentri descrivono una traiettoria nota come **evolva metacentrica** (insieme dei centri dei raggi metacentrici istantanei).

Il momento della coppia di stabilità, analogamente a quanto già visto per piccole inclinazioni, vale:

$$M_{\alpha} = \Delta \cdot b = \Delta \cdot \overline{GH}$$

Volendo esprimere tale braccio \overline{GH} in funzione di quantità note, conviene fare riferimento ai punti P_1, P_2, P_3, \dots , intersezione della linea d'azione della spinta iniziale (verticale della nave) con linee d'azione delle successive spinte relative ai centri di carena B_0, B_1, B_2, \dots tali punti vengono chiamati *prometacentri* o *falsi metacentri*.



La distanza del generico prometacentro P_i dal centro di carena iniziale B_0 prende il nome di altezza prometacentrica "h"

Si può pertanto scrivere:

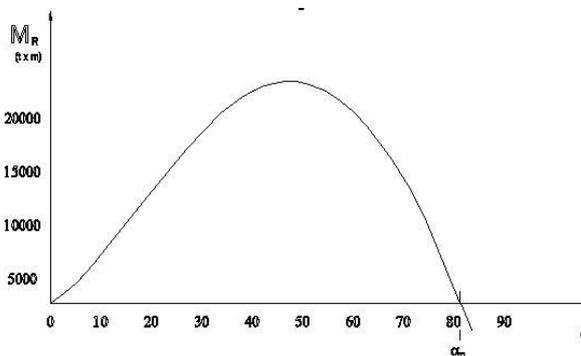
$$M_{\alpha} = \Delta \cdot \overline{GH} = \Delta \cdot \overline{GP} \sin \alpha = \Delta (h - a) \sin \alpha$$

Per facilitare lo studio della stabilità di una nave si ricorre ai diagrammi di stabilità statica.

Diagramma di stabilità statica trasversale

Portando su due assi ortogonali, in ascissa i valori degli angoli di inclinazione α (in gradi), ed in ordinata i valori dei momenti M_{α} corrispondenti (in tonn. m.), ricavati mediante l'espressione sopra scritta, si ottiene un diagramma chiamato diagramma di stabilità statica trasversale che fornisce i valori dei momenti di coppia di stabilità al variare dell'angolo di inclinazione trasversale α della nave.

Come si vede nella figura, che rappresenta l'andamento di un generico diagramma di stabilità in funzione



dell'angolo di inclinazione, il valore del momento varia da zero per $\alpha=0$ ad un valore massimo e poi decresce sino ad annullarsi nuovamente in corrispondenza di $\alpha=\alpha_c$. Tale angolo α_c è detto angolo di **capovolgimento statico**.

Le posizioni $\alpha=0$ e $\alpha=\alpha_c$ sono entrambe posizioni di equilibrio, ma, mentre la prima è una posizione di equilibrio stabile poiché la nave ha tendenza, se inclinata, a ritornare in questa posizione (momento positivo), la seconda è una posizione di equilibrio instabile, in quanto, inclinando la nave verso angoli maggiori, la coppia di stabilità risulta negativa e quindi tende ad inclinare ulteriormente la nave, fino al suo capovolgimento.

Riserva di stabilità

Se vogliamo provocare su di una nave inclinata trasversalmente una ulteriore inclinazione infinitesima $d\alpha$ dobbiamo compiere un lavoro sulle forze resistenti ed in particolare sul momento della coppia di stabilità trasversale.

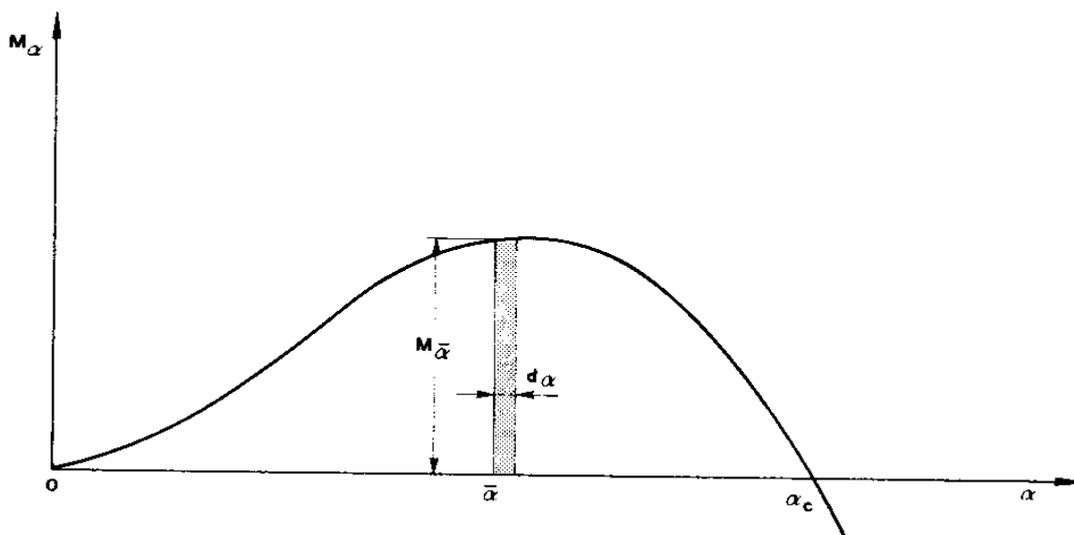
Tale lavoro sarà espresso dal prodotto del momento della coppia nella condizione $\bar{\alpha}$ considerata, per la rotazione infinitesima $d\alpha$;

$$dL = M_{\alpha} d\alpha = D(h-a)\text{sen}\alpha d\alpha$$

rappresentato dall'area sottesa dal diagramma di stabilità nell'intorno dell'angolo considerato.

Il lavoro necessario per portare la nave dalla posizione dritta di equilibrio stabile alla inclinazione $\bar{\alpha}$ senza velocità finale ed in mezzo calmo non resistente sarà:

$$L_{\alpha} = \int_0^{\bar{\alpha}} M_{\alpha} d\alpha = \int_0^{\bar{\alpha}} D(h-a)\text{sen}\alpha d\alpha$$



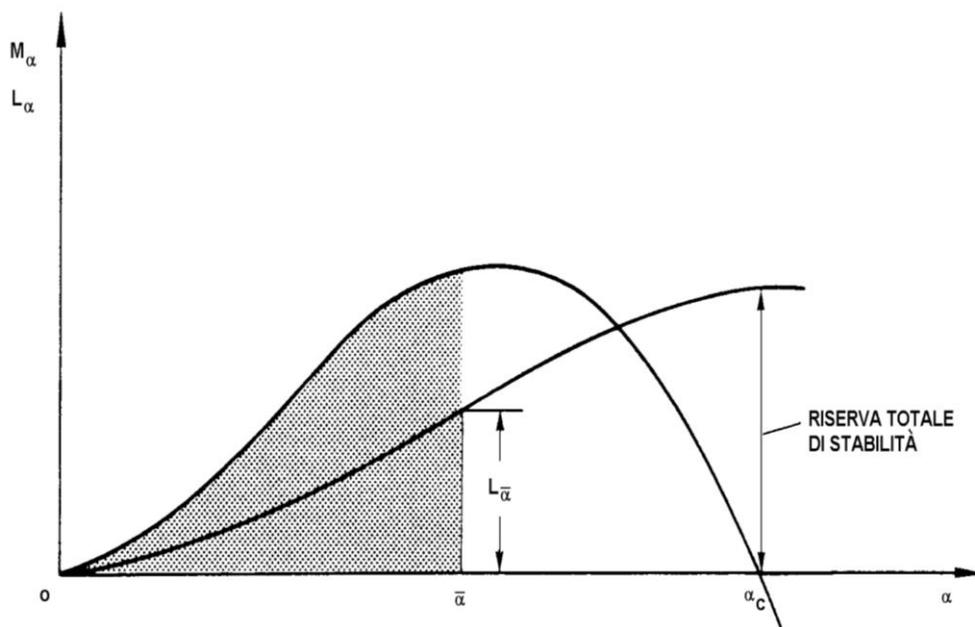
la cui misura, rappresentata dall'area del diagramma di stabilità compresa tra $\alpha=0$ e $\alpha=\bar{\alpha}$ prende il nome di **RISERVA DI STABILITÀ** della nave relativa alla inclinazione $\bar{\alpha}$.

L'area totale sottesa dal diagramma di stabilità fino all'angolo di capovolgimento statico misura dunque il lavoro che occorre compiere per capovolgere la nave, ossia il lavoro totale che la nave è capace, con il momento della coppia di stabilità, di opporre al lavoro delle forze esterne che tendono a capovolgerla.

La misura di questo lavoro si dice **RISERVA TOTALE DI STABILITÀ**.

Il diagramma integrale di quello di stabilità statica si dice *DIAGRAMMA DI STABILITÀ DINAMICA*. Le ordinate di tale diagramma rappresentano per ogni angolo, in opportuna scala, l'area sottesa dal diagramma di stabilità statica a sinistra dell'angolo considerato fino alla posizione dritta.

L'ordinata massima del diagramma di stabilità dinamica misura l'area del diagramma di stabilità statica (in corrispondenza quindi dell'angolo di capovolgimento).



Stabilità di forma e di peso

Il valore del raggio metacentrico trasversale dipende dalla forma della carena, mentre il valore della sovrelevazione “a” di G su B, dipende dalla distribuzione dei pesi sulla nave.

Può essere interessante mettere in evidenza i rispettivi contributi della forma e dei pesi nel momento di stabilità, suddividendolo rispettivamente la *componente di stabilità di forma* e la *componente di stabilità di peso*:

$$M_{\alpha} = \Delta(r - a)\text{sen}\alpha = \Delta r \text{sen}\alpha - \Delta a \text{sen}\alpha \quad (\text{forma} - \text{peso})$$

La forma e l'estensione del diagramma di stabilità statica trasversale, sono (a parità di altre condizioni) influenzate dai seguenti parametri:

- altezza delle murate (stabilità di forma);
- forma delle murate (stabilità di forma);
- posizione del centro di gravità della nave G (stabilità di peso);
- larghezza della nave (stabilità di forma).

Tale influenza è evidente valutando i diagrammi di stabilità che si riportano nella figura seguente.

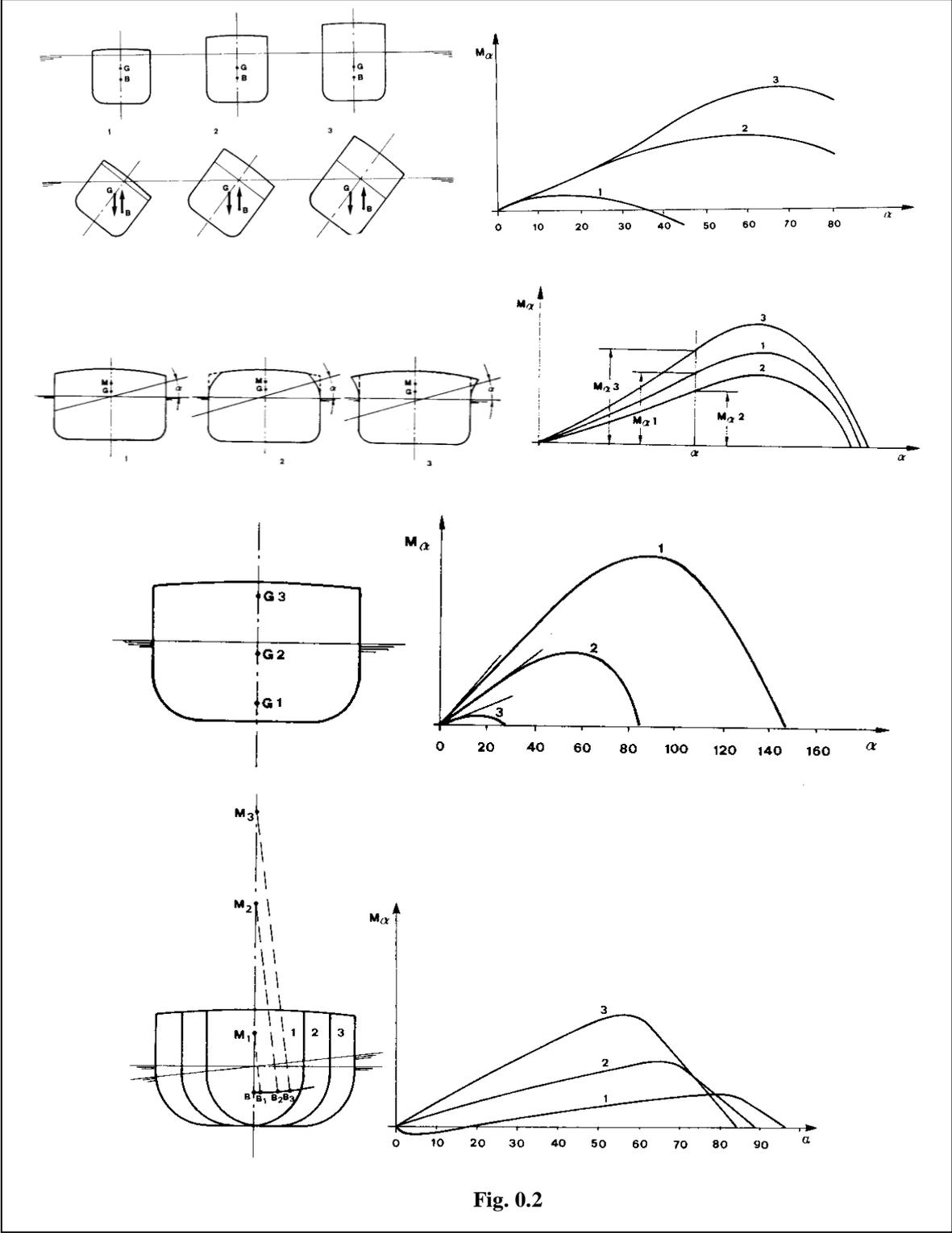


Fig. 0.2

Determinazione del centro di gravità di una nave – Prova di stabilità

Abbiamo visto che il valore di $(r-a)$ dipende sia da elementi geometrici (r) che meccanici (a).

Mentre la determinazione di quelli geometrici, mediante conoscenza del piano di costruzione, non pone alcun problema, esistono invece possibili incertezze per quanto concerne l'esatta posizione del baricentro.

Tale posizione viene stimata in sede progettuale per le diverse condizioni di carico dall'analisi dei pesi costituenti la nave e la loro posizione; ma occorre condurre ulteriori prove pratiche durante la vita della nave.

La prova ordinariamente si esegue:

- dopo che la nave è stata varata;
- dopo che la nave è stata completamente allestita e portata alla voluta condizione di carico (per le dovute verifiche contrattuali);
- dopo che la nave ha subito lavori di trasformazione o modifica (per apportare eventuali aggiornamenti o variazioni alla stabilità);
- periodicamente durante il suo servizio.

La prova si effettua portando la nave sullo specchio d'acqua di un bacino, in assenza di vento, in posizione perfettamente diritta eliminando eventuali assetti longitudinali ed assicurandosi che gli ormeggi siano in bando.

Prima di effettuare la prova occorre controllare che non vi siano a bordo carichi scorrevoli o specchi liquidi liberi e che a bordo sia rimasto solo il personale interessato alla prova.

Si sistemano sul ponte di coperta nella zona più larga della nave due ferroguidi su cui si fa poggiare un carrello, all'uopo imbarcato, portante un peso di zavorra, libero di scorrere da murata a murata.

Si dispongono anche uno o più fili a piombo per misurare le inclinazioni trasversali che nascono dallo spostamento trasversale del carrello di prova.

Il peso sul carrello deve essere di entità trascurabile rispetto al dislocamento della nave e tale da provocare, quando spostato a murata, delle piccole inclinazioni trasversali.

Posto il carrello inizialmente sul piano di simmetria, si sposta successivamente a murata.

Il peso p del carrello una volta spostato trasversalmente creerà una coppia sbandante equilibrata dalla coppia di stabilità trasversale e la nave assumerà una inclinazione α ricavabile dall'eguaglianza dei momenti:

$$\Delta(h-a)\text{sen}\alpha = p y \cos \alpha$$

dove x è lo spostamento trasversale del peso p .

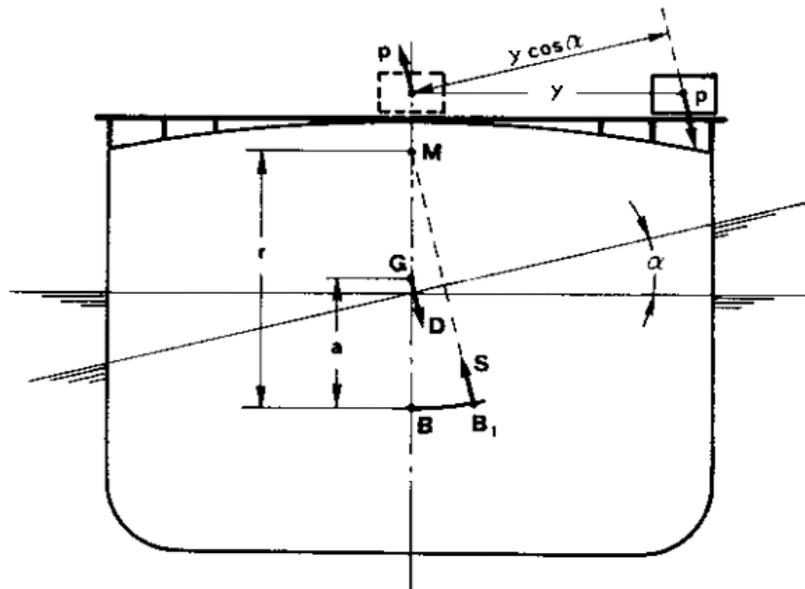
Il peso p viene opportunamente scelto in modo che l'inclinazione finale α sia relativamente piccola e quindi si possa applicare la semplificazione del metodo metacentrico:

$$\Delta(r-a)\text{sen}\alpha = p y \cos \alpha$$

$$r - a = \frac{p y}{\Delta \text{tg} \alpha}$$

da cui, essendo tutti i termini noti, si può ricavare a:

$$a = r - \frac{p y}{\Delta \text{tg} \alpha}$$



Mezzi per aumentare il valore dell'altezza metacentrica

Può accadere che, eseguita la prova di stabilità, si trovi un valore dell'altezza metacentrica ($r-a$) diverso da quello previsto in sede di progetto.

I metodi correttivi da adottare sono due ed agiscono sulla stabilità di peso o di forma:

- abbassare pesi verso il basso, qualora possibile;
- zavorrare la nave imbarcando in sentina pani di ghisa o blocchi di cemento con conseguente aumento del dislocamento e diminuzione della velocità contrattuale;
- aumentare il momento d'inerzia minimo della figura di galleggiamento agendo cioè sul rapporto $r = I_x/V$, ovvero allargando la figura stessa con l'applicazione nella zona di galleggiamento di controbordi o bottazzi.

Stabilità statica longitudinale

Lo studio della stabilità statica longitudinale non influenza direttamente la sicurezza della nave, in quanto la nave reagisce alle inclinazioni longitudinali con altissimi valori della coppia di stabilità come successivamente dimostrato; lo studio ha invece una grande importanza per la verifica dell'assetto della nave e le sue variazioni nelle diverse condizioni di carico. Lo studio degli assetti, cioè delle differenze di immersione tra prora e poppa, è di grande importanza ai fini dell'analisi della resistenza al moto e del comportamento della nave in moto ondos.

La coppia di stabilità statica longitudinale viene determinata con ragionamenti del tutto analoghi a quelli effettuati per la coppia trasversale. Bisogna però considerare che le inclinazioni longitudinali, a causa della grande inerzia che la nave oppone ai movimenti di beccheggio, sono dell'ordine di pochi gradi, rientrando sempre nel campo di applicazione del metodo metacentrico. Il raggio metacentrico longitudinale è molto più alto del raggio metacentrico trasversale essendo $R=J_y/V$ perché $J_y \gg J_x$ si avrà $R \gg r$.

Il momento di stabilità longitudinale varrà :

$$M_{\beta} = D \cdot \overline{GH} = D \cdot \overline{GM} \sin \beta$$

sostituendo:

$$M_{\beta} = D(R - a) \sin \beta$$

e trascurando a essendo molto più piccolo di R :

$$M_{\beta} \cong DR \sin \beta$$

Cause di variazione della stabilità della nave

Le cause principali di variazione della stabilità sono:

- Spostamento dei pesi
- Sospensione di un peso
- Carichi scorrevoli
- Materiali caricati alla rinfusa
- Carichi liquidi
- Imbarco e sbarco di pesi
- Allagamento per falla
- Incaglio
- Immissione della nave in bacino
- Accostata ed evoluzione
- Azione del vento al traverso combinata con il rollio

Di queste esamineremo solo le più significative.

Spostamento verticale

Quando un peso p viene innalzato verticalmente della quantità z , il centro di gravità della nave si sposta verticalmente da G a G_1 della quantità:

$$\overline{GG_1} = \frac{pz}{\Delta} \quad (1)$$

infatti indicando con Z_G e con Z_{G_1} le posizioni del baricentro rispetto alla linea di costruzione e con z_p e z_p' le posizioni iniziali e finali del peso p si avrà dal teorema dei momenti statici:

$$\Delta Z_{G_1} = \Delta Z_G + pz_{p'} - pz_p$$

da cui essendo $z = z_{p'} - z_p$ e $\overline{GG_1} = Z_{G_1} - Z_G$ si ottiene la relazione (1).

Ne consegue che l'altezza metacentrica risulterà variata e varrà:

$$(r - a') = (r - (a + pz/\Delta))$$

Tale grandezza ovviamente risulterà accresciuta o diminuita a seconda che lo spostamento sia avvenuto verso il basso o verso l'alto. In particolare si nota come uno

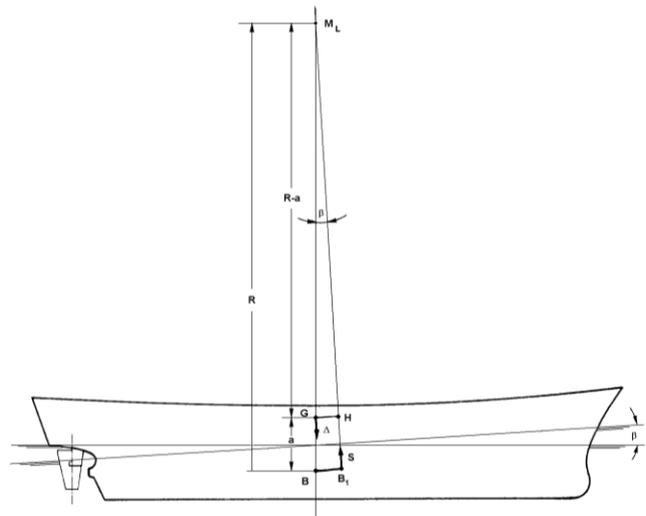
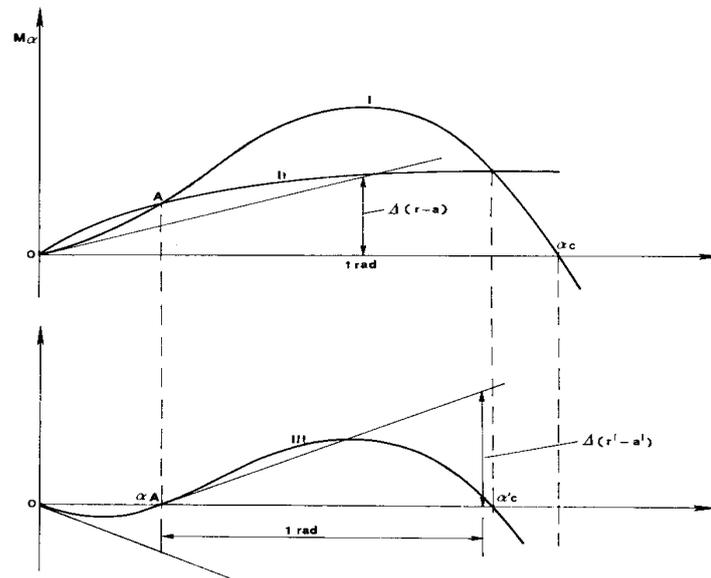
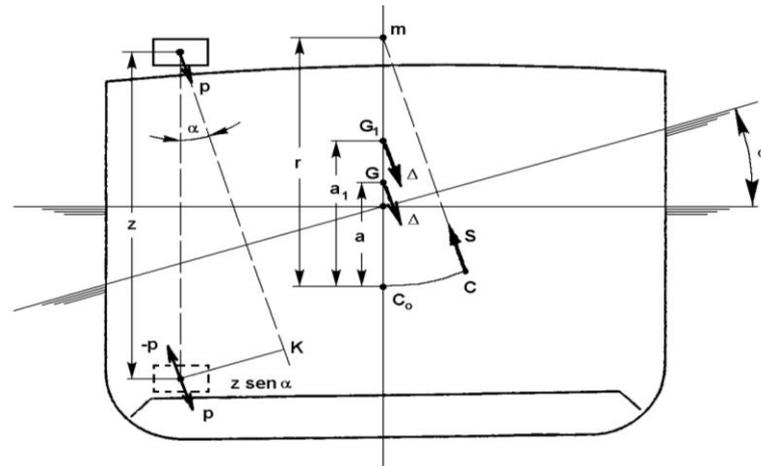


Fig. 0.3

spostamento verso l'alto sia penalizzante ai fini della stabilità riducendo il valore $(r-a)$ della quantità pz/Δ .



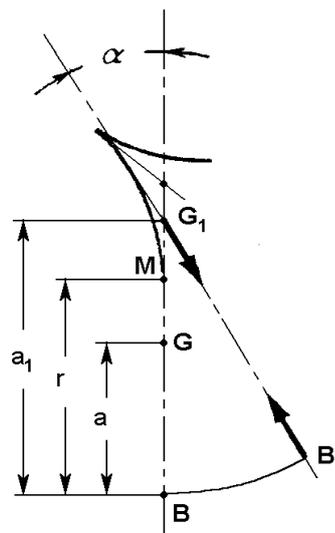
Nave ingavonata

Se l'innalzamento di peso è tale da portare il baricentro al di sopra del metacentro trasversale iniziale M, la nave non risulterà essere in equilibrio stabile nella posizione diritta in quanto $r-a < 0$.

Bisognerà quindi analizzare il comportamento della nave nell'intorno della posizione diritta; valutando l'andamento dell'evolva metacentrica.

Se l'evoluta è a rami inizialmente ascendenti, la nave si inclinerà e troverà un angolo di equilibrio stabile, detto ANGOLO DI INGAVONAMENTO, ottenuto portando dal baricentro G' la tangente all'evoluta stessa.

La nave ingavonata si inclinerà quindi non per eccentricità del carico ma per instabilità iniziale. Per raddrizzarla occorre spostare dei carichi verso il basso in modo da riportare il baricentro G al di sotto del metacentro trasversale iniziale M . In questo caso spostando trasversalmente del carico sul lato opposto a quello di inclinazione, come l'intuito potrebbe addurci, otterremmo come risultato quello di portare la nave inizialmente in posizione diritta ma, non appena raggiunta tale condizione, la nave si inclinerebbe dal lato opposto con una inclinazione maggiore della precedente.



Spostamento trasversale

Quando il peso p viene spostato trasversalmente della quantità y e viene ad esercitarsi sulla nave l'azione della coppia sbandante pari a :

$$M_{\alpha} = p y \cos \alpha$$

che dà luogo all'inclinazione trasversale α .

Tale inclinazione sarà facilmente individuabile dall'equilibrio dei momenti:

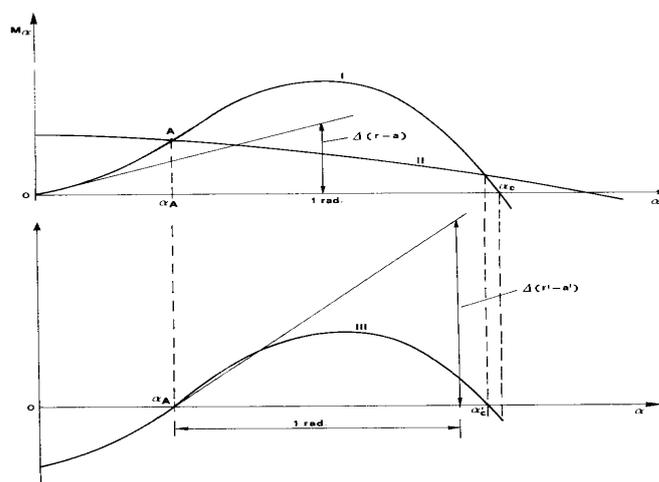


fig. 3.36

$$p y \cos \alpha = \Delta(h - a) \sin \alpha$$

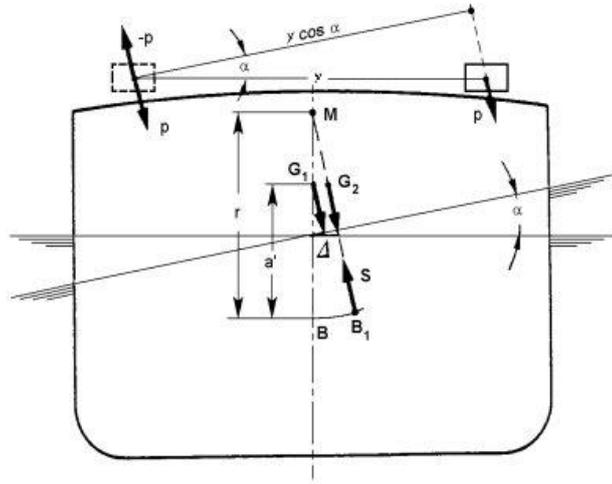
da cui:

$$\tan \alpha = \frac{py}{\Delta(h-a)}$$

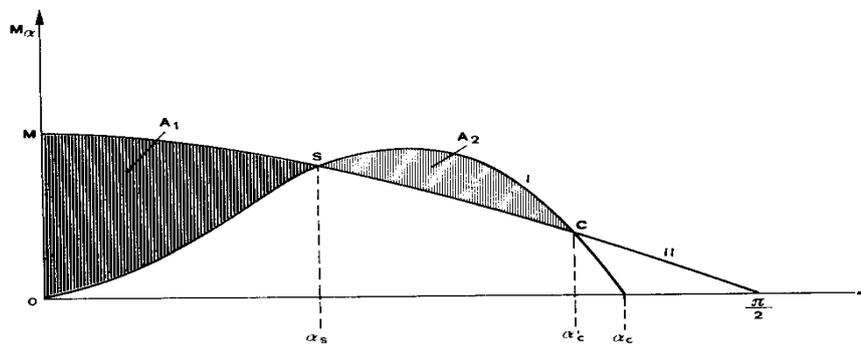
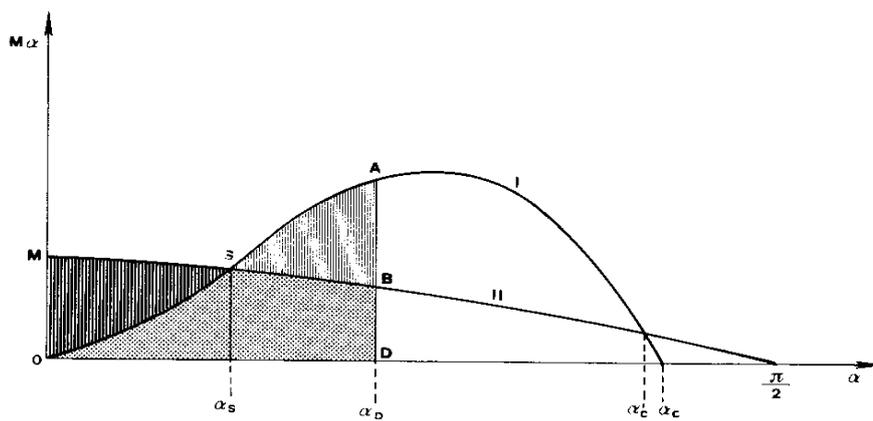
Se l'angolo di inclinazione non supera i 10° si potrà ricorrere alla semplificazione del metodo metacentrico sostituendo h con r .

Per cui:

$$\tan \alpha = \frac{py}{\Delta(r-a)}$$



Analisi dinamica



Spostamento longitudinale

Quando un peso p , facente parte del dislocamento Δ della nave, viene spostato orizzontalmente in senso longitudinale per un tratto x , si viene ad esercitare sulla nave l'azione di una coppia sbandante pari a:

$$M_{\beta} = px \cos \beta$$

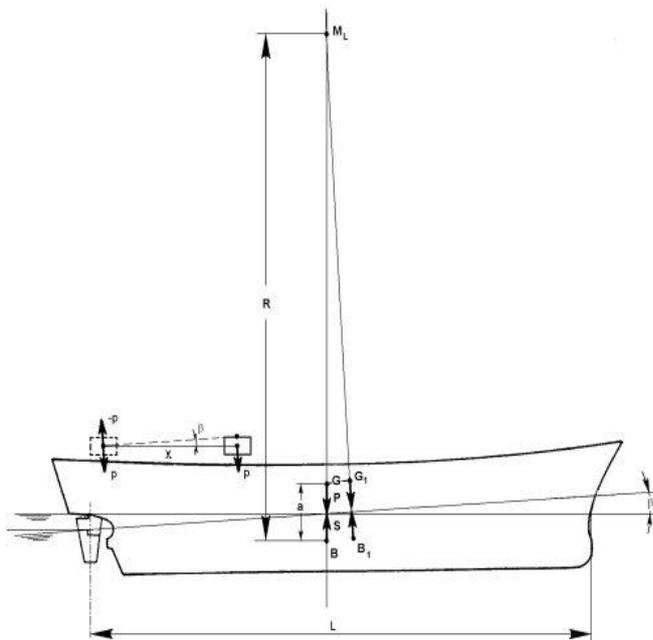
dove β rappresenta l'angolo per il quale il momento di stabilità longitudinale bilancia il momento sbandante.

$$\Delta(R - a) \sin \beta = px \cos \beta$$

da cui:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{px}{\Delta R}$$

Generalmente uno spostamento di peso in senso longitudinale non compromette la stabilità longitudinale, ma risulta essere importante per le variazioni di assetto che provocano cambiamenti nei riguardi della resistenza al moto e della tenuta al



mare in generale.

Momento unitario d'assetto

Si definisce momento unitario d'assetto quel momento inclinante longitudinalmente la nave, inizialmente dritta, capace di provocare una variazione di immersione tra prora e poppa unitaria, cioè di un centimetro.

Tale grandezza è molto utile nei calcoli di assetto longitudinale e viene riportata nella tavola delle carene diritte. La sua espressione viene ricavata nel seguente modo: su una nave di dislocamento D , lunghezza tra le perpendicolari L , raggio metacentrico longitudinale R , si sposti un peso "p" longitudinalmente per un tratto orizzontale "y". Affinché sia verificato l'equilibrio dei momenti inclinante e raddrizzante, sarà:

$$py \cos \beta = D(R - a) \sin \beta \text{ da cui:}$$

$$py = D(R - a) \tan \beta \text{ essendo anche:}$$

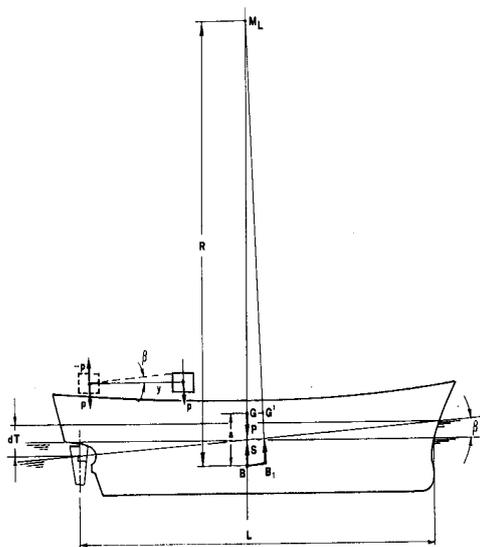


fig. 3.42

Fig. 0.4

$$\tan \beta = \frac{dT}{L} \text{ sostituendo: } py = D(R - a) \frac{dT}{L}$$

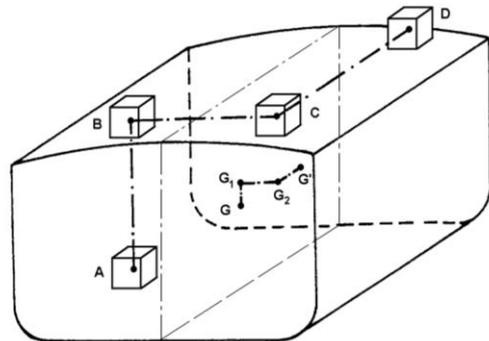
Indicando con M_u il momento unitario d'assetto, cioè quel particolare valore del momento "py" capace di dare luogo ad una variazione della differenza di immersione $dT=0.01$ m si avrà:

$$M_u = D(R - a) \frac{0.01}{L} \text{ oppure trascurando a rispetto ad R:}$$

$$M_u = \frac{DR}{100L}.$$

Spostamento generico di un peso

Se un peso facente parte del dislocamento Δ viene spostato dal punto A al punto D, il dislocamento non varia, varia invece la posizione del baricentro della nave e di conseguenza l'assetto trasversale, longitudinale e gli attributi di stabilità. Osservando che a spostamento avvenuto le condizioni di stabilità ed assetto sono le stesse qualunque sia il percorso effettuato da p per passare da A a D, si può pensare che lo spostamento \overline{AD} avvenga parallelamente ai tre assi principali xyz, ovvero:



1. spostamento verticale \overline{AB} (punto avente la stessa altezza di D) con conseguente variazione delle caratteristiche di stabilità trasversale come verificato per uno spostamento verticale di peso;
2. spostamento trasversale \overline{BC} (punto avente la stessa ascissa di D) con la variazione delle caratteristiche di stabilità trasversale studiate per lo spostamento trasversale;
3. spostamento longitudinale \overline{CD} , con la relativa variazione dell'assetto longitudinale.

Il risultato finale sarà dato dalla somma dei tre effetti.

Carichi sospesi

Un peso p, sospeso ad un punto sopraelevato e libero di oscillare, influenza le caratteristiche di stabilità della nave. Infatti per qualunque inclinazione la retta d'azione di tale peso passa proprio per il punto di sospensione e, ai fini della stabilità, è come se il carico fosse applicato proprio in tale punto.

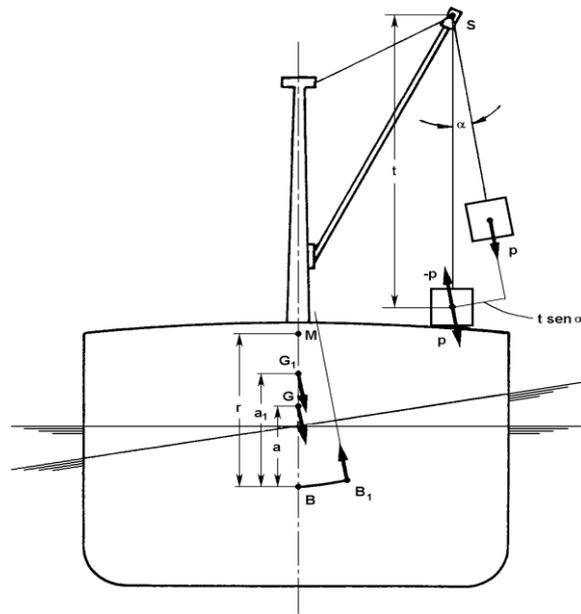
Si ricadrà dunque nel caso di spostamento verticale di peso. Si può pensare ad una causa inclinante per cui:

$$M = ptsen\alpha$$

dove $t \text{ sen}\alpha$ è il braccio della coppia fittizia p, -p, creata dalla sospensione del carico e t è l'altezza del punto di sospensione.

Il baricentro risulterà innalzato dunque della quantità pt/Δ che è la riduzione dell'altezza metacentrica (vedi spostamento verticale del peso).

Da quanto precede risulta chiaro come sia importante, nell'elevare pesi di una certa entità, vincolarli con paranchi di ritenuta, venti ed altri mezzi che ne riducano le oscillazioni; questo sia per contenere le riduzioni di stabilità trasversale quando ci si trovi in condizioni critiche, sia perché il carico non urti danneggiandosi o provocando danni a persone o strutture.



Carichi scorrevoli

Se a bordo di una nave, inizialmente diritta e stabile, si trova un carico non rizzato e la nave si inclina per una causa qualunque, possono nascere notevoli problemi per quanto riguarda la stabilità. Infatti quando l'angolo di inclinazione trasversale sarà pari all'angolo di attrito di primo distacco, il corpo comincerà a strisciare o rotolare andando a fermarsi contro un eventuale ostacolo che può essere rappresentato da una paratia. Se tale angolo non viene superato il carico si comporta come se fosse rigidamente vincolato alla nave.

Si ricade dunque nel caso di spostamento trasversale di peso in cui il momento di stabilità dovrà equilibrare il momento sbandante:

$$M_{\alpha} = py \cos \alpha$$

e ciò accadrà per un certo valore α di sbandamento della nave (vedi spostamento trasversale di pesi).

Tale spostamento trasversale, essendo improvviso ed incontrollato, può essere pericoloso per l'equipaggio, le strutture e le apparecchiature; nel caso di navi che trasportano carichi pesanti come lamiere o tondini d'acciaio, gli spostamenti trasversali del carico possono essere tali da portare la nave a situazioni critiche di stabilità e sicurezza, soprattutto in condizioni di mare molto agitato.

Carichi liquidi

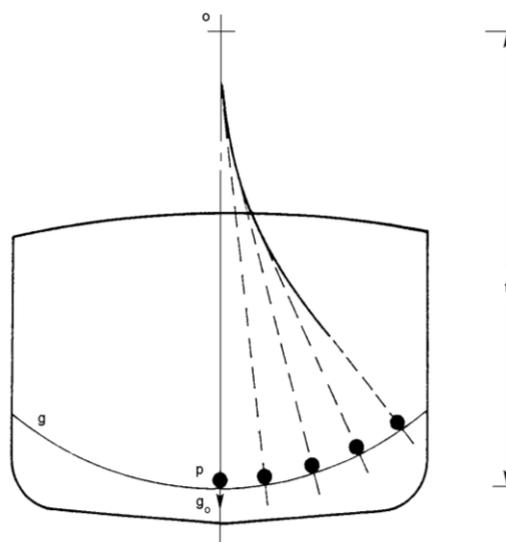
Tra i carichi che costituiscono il dislocamento Δ di una nave vi sono sempre dei carichi liquidi che comportano problemi di stabilità.

Se il liquido riempie completamente un recipiente o una cassa chiusa si comporta come un carico solido rigidamente collegato allo scafo. Se invece il carico liquido (di peso p e peso specifico Ω) non riempie completamente il compartimento, allora, a causa della sua fluidità, inizia ad agitarsi con l'inclinarsi della nave, tendendo a portare il pelo libero parallelo al galleggiamento istantaneo, per cui il suo baricentro (che coincide sempre con il centro del volume) si sposterà rispetto alle pareti del recipiente e quindi allo scafo. Il centro

di volume istantaneo descriverà una curva dando luogo ad uno spostamento del centro di gravità della nave, variabile con l'inclinazione.

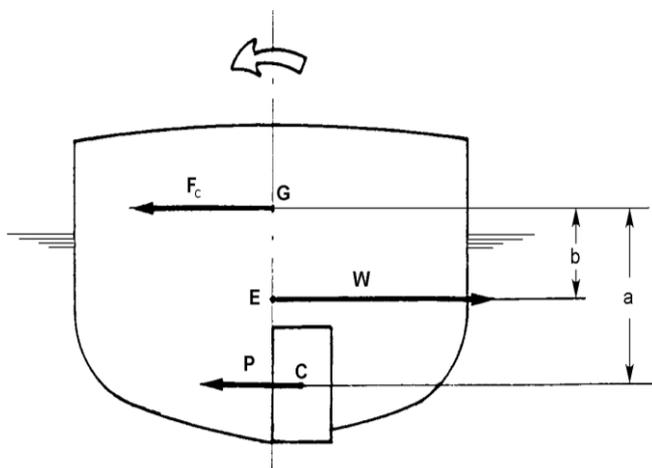
L'azione della liquidità del carico sulla stabilità trasversale della nave, è riconducibile pertanto a quella di un peso p libero di scorrere secondo la curva g in figura e a sua volta riconducibile agli effetti di un carico sospeso nel punto O .

Sotto queste ipotesi, l'altezza metacentrica, per effetto dello specchio libero, anziché essere $(r-a)$ sarà: $(r-a-pt/\Delta)$, dove t è il raggio di curvatura della curva g nel punto g_0 , baricentro del liquido a nave diritta e punto di sospensione fittizio.



Accostata ed evoluzione

La diminuzione di stabilità trasversale dovuta all'azione del timone può essere particolarmente sensibile specie per le navi militari a causa delle elevate qualità evolutive richieste.



Durante la fase di evoluzione a seguito della impostazione di un certo angolo di barra sono presenti le seguenti forze.

1. la componente della forza centrifuga applicata nel centro di gravità G ;
2. la risultante delle azioni idrodinamiche applicate nel centro di deriva E (baricentro della figura di deriva);
3. la portanza del

timone applicata nel centro di pressione C .

La risultante dei momenti creati da queste forze rispetto ad un polo di riferimento, viene equilibrata dalla coppia di stabilità della nave. Dall'equilibrio dei momenti si deduce l'angolo di equilibrio statico secondo cui si dispone la nave in accostata, infatti, se calcoliamo i momenti rispetto all'asse baricentrico otterremo:

$$M_1 = W \cdot b \quad e \quad M_2 = P \cdot a$$

Essendo $M_1 > M_2$ la nave si sbanderà verso l'esterno durante tutta la fase di evoluzione. L'angolo di sbandamento dipenderà dall'angolo di barra e dalla velocità della nave.

N.B. Si definisce fase di evoluzione quel periodo in cui a causa della variazione dell'angolo di barra la nave cambia di direzione e raggiunge un nuovo angolo costante di girazione.

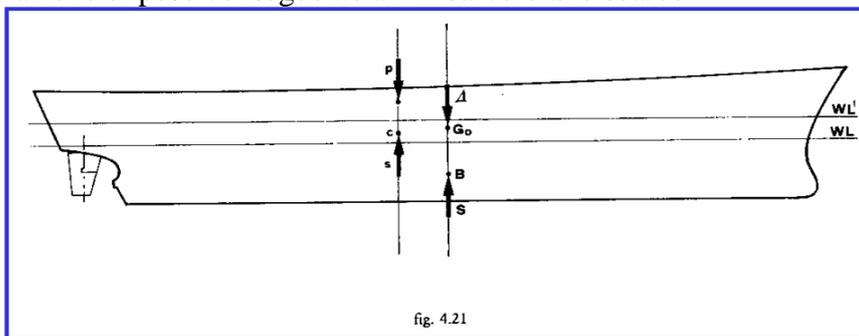
Imbarco e sbarco di pesi

L'imbarco di un peso in un punto qualunque della nave si può sempre considerare come un'operazione suddivisa in due tempi:

1. imbarco del peso in un punto della nave tale che la nave si immerga parallelamente al galleggiamento che aveva prima dell'imbarco;
2. spostamento del peso dalla posizione fittizia di cui al punto precedente fino a quella finale effettiva.

Come conseguenza della prima fase la nave aumenterà la sua immersione media; come conseguenza della seconda varieranno, in generale, l'inclinazione trasversale, l'assetto longitudinale e la stabilità.

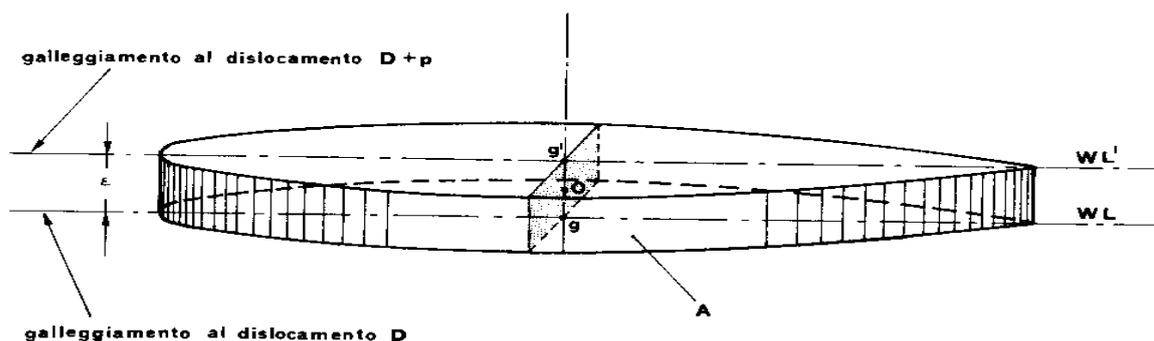
Affinché accada che, imbarcando o sbarcando un peso, la nave si immerga o emerga parallelamente al precedente galleggiamento, cioè senza variazioni di assetto né trasversale né longitudinale, occorre che il baricentro del peso venga imbarcato o sbarcato sulla stessa verticale passante per il centro di spinta della carena di sovraimmersione. In tal modo infatti la forza p del peso imbarcato o sbarcato verrà perfettamente equilibrata dalla forza spinta dovuta alla zona di carena che si aggiunge o si sottrae alla precedente per effetto della variazione di peso conseguente all'imbarco o allo sbarco.



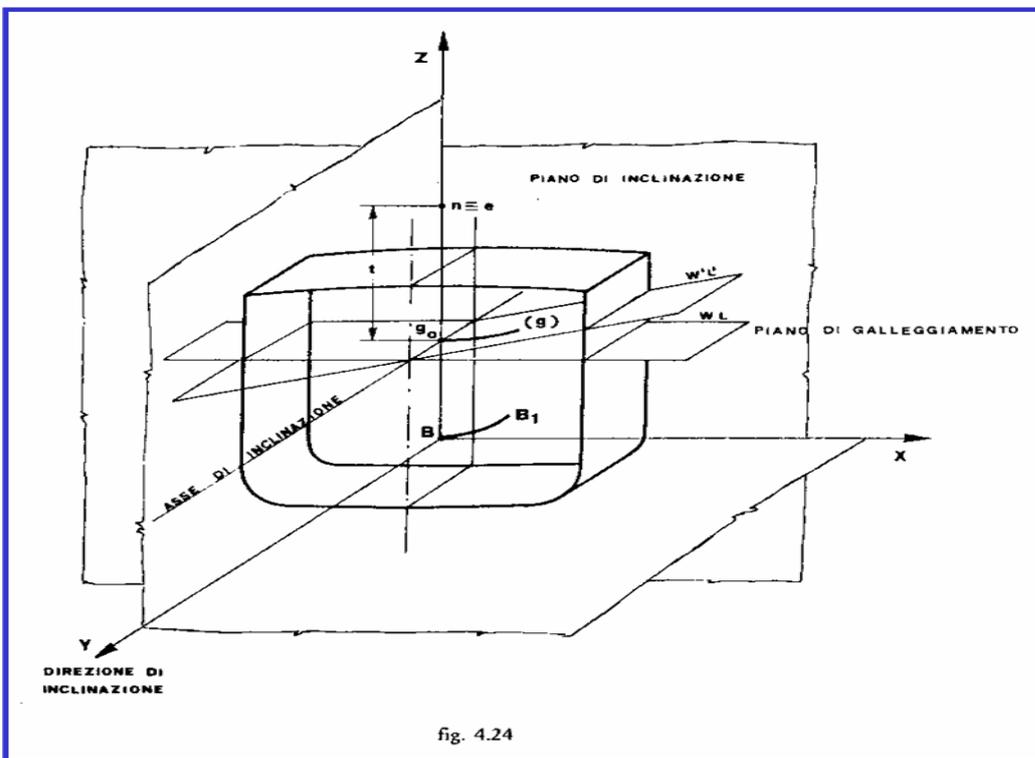
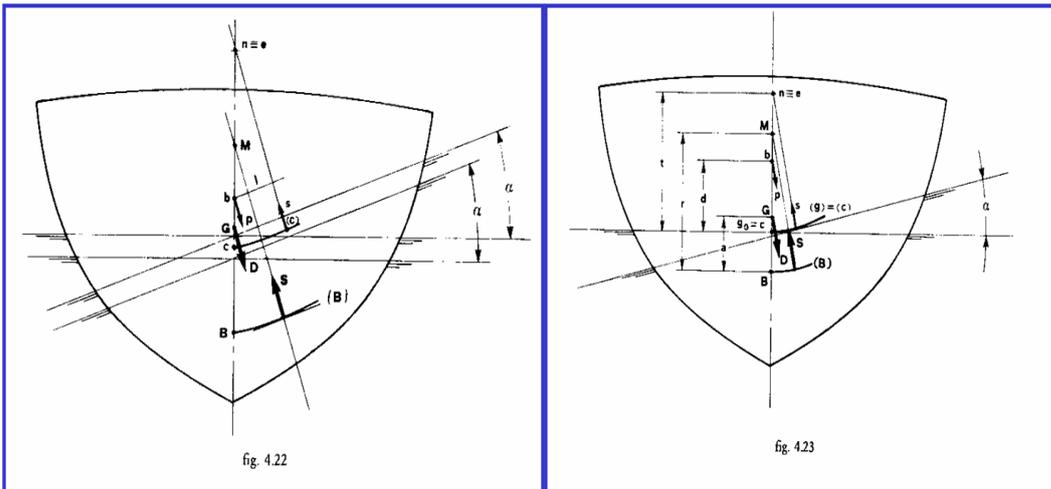
Se il peso p è piccolo e quindi è piccola la differenza di immersione conseguente, il calcolo viene notevolmente semplificato potendosi ammettere che la verticale che passa per il baricentro della carena di sovraimmersione passi anche per il baricentro della figura di galleggiamento. In quest'ultimo caso, essendo:

- w = peso specifico dell'acqua di mare
- A = area della figura di galleggiamento
- p = peso imbarcato o sbarcato
- v = volume della carena di sovraimmersione
- ε = altezza della carena di sovraimmersione

si può scrivere: $p = v \cdot w = (A\varepsilon)w$ ed anche $\varepsilon = \frac{p}{wA}$



Metacentro differenziale



Possiamo determinare le variazioni di assetto di prora e di poppa conseguenti ad un imbarco o ad uno sbarco di un peso piccolo in un punto qualunque della nave, come sommatoria delle immersioni di prora e di poppa iniziali, della sovrainnersione/emersione ε e delle variazioni di assetto dovute allo spostamento fittizio del peso dal baricentro della figura di galleggiamento al reale punto di imbarco/sbarco.

Per facilitare la conoscenza della posizione del metacentro differenziale e di conseguenza degli effetti sulla stabilit  causati da imbarchi /sbarchi di pesi , in pratica si ricorre al metodo di Guyon.

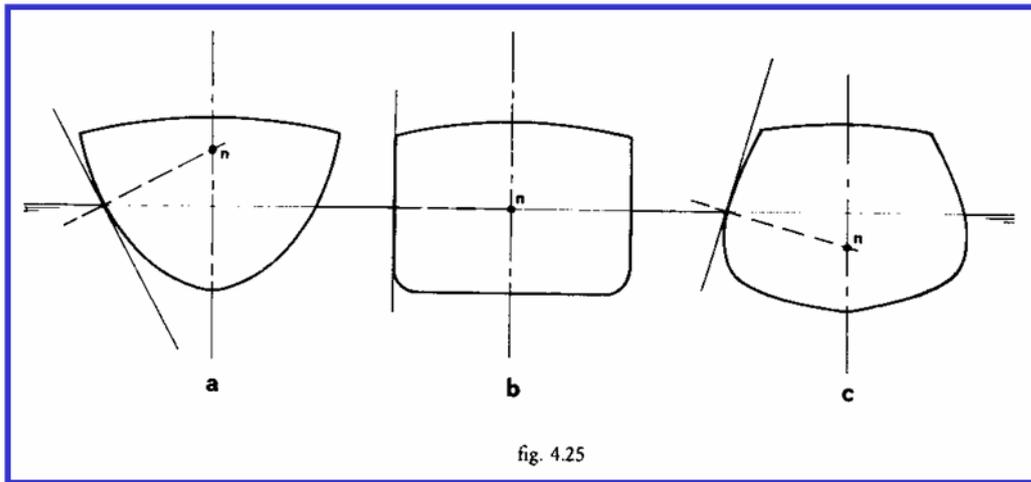


fig. 4.25
METODO DI GUYON

Per quanto riguarda la stabilità trasversale, di massima, possiamo dire che:

- L'imbarco di un peso in basso (sotto il galleggiamento) aumenta la stabilità.
- L'imbarco di un peso in alto (sopra il galleggiamento) diminuisce la stabilità.
- Lo sbarco di un peso in basso (sotto il galleggiamento) diminuisce la stabilità.
- Lo sbarco di un peso in alto (sopra il galleggiamento) aumenta la stabilità.

Falla

La falla è una via d'acqua nell'opera viva della nave che comporta l'allagamento di parte di essa con sensibili alterazioni della stabilità e dell'assetto iniziale della nave.

Generalmente il baricentro della massa d'acqua imbarcata è al di sotto del baricentro iniziale della nave e quindi la falla sembrerebbe provocare un aumento della stabilità.

Trattandosi di un carico liquido a specchio libero di notevole entità, normalmente il relativo effetto negativo sulla stabilità è preponderante rispetto all'effetto positivo dell'imbarco sotto il galleggiamento.

In definitiva la falla provoca generalmente una riduzione di tutti gli attributi di stabilità e una variazione di assetto longitudinale e, soltanto se il locale allagato è eccentrico rispetto al piano diametrale della nave, anche un'inclinazione trasversale.

La compartimentazione stagna

Lo scopo principale della compartimentazione mediante paratie stagne è quello di limitare le zone di allagamento causato da accidentali imbarchi di acqua riducendo nello stesso tempo la presenza di specchi liquidi

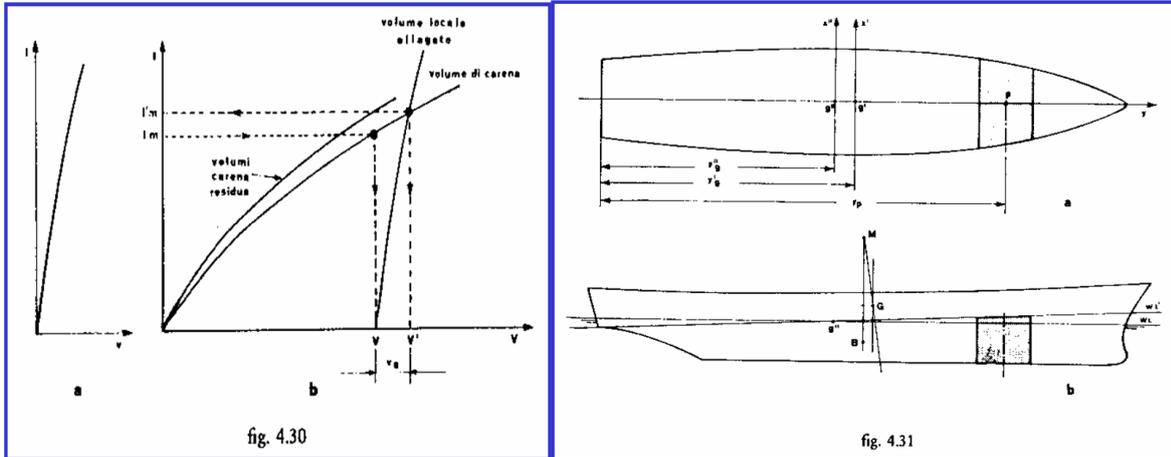
Il numero ed il posizionamento di dette paratie è regolato da norme di sicurezza redatte dai Registri di classificazione (per le navi mercantili) in base al tipo di nave ed alla navigazione cui è destinata.

È comunque previsto un numero minimo di paratie stagne:

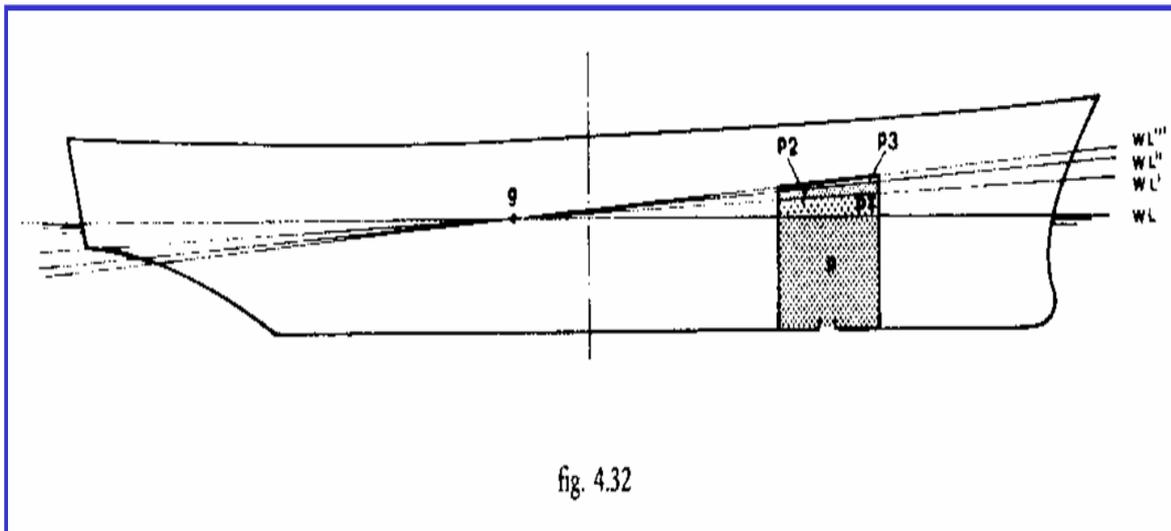
- quella prodiera "di collisione";
- quelle delimitanti l'A.M.;
- quella poppiera "del premitrecc" (così detta perché dotata di passaggi stagni per l'asse/assi portaelica);

.La nave sarà quindi compartimentata da paratie stagne trasversali estese da murata a murata, dal fondo fino al ponte delle paratie stagne. Tale ponte stagno può essere continuo o a gradini e sotto di esso sono intestate tutte le paratie trasversali principali stagne.

Metodo dell'imbarco di peso



Metodo della sottrazione di carena



Incaglio

Si definisce “incaglio” l'appoggio sul fondo della nave in uno o più punti della carena, tale che il peso del volume di acqua spostata S' dopo l'incaglio (diverso da S prima dell'incaglio), sia inferiore al peso della nave (D).

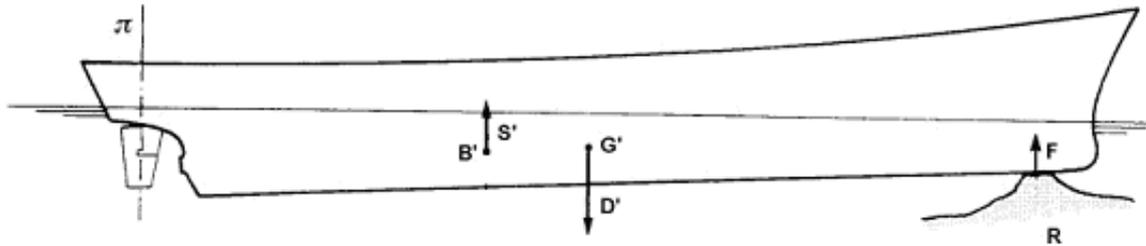


Fig. 0.5

Poiché deve essere comunque assicurato l'equilibrio delle forze agenti sulla nave, se la nave è in equilibrio, essendo $S' < D$, evidentemente nel punto di incaglio si manifesta una reazione di appoggio F di entità tale da annullare la differenza tra peso e spinta e tale che sia:

$$F = D - S'$$

Tale reazione diretta verso l'alto può essere considerata come lo sbarco di un peso di pari entità dal punto in cui essa è applicata.

Essendo tale punto sul fondo della nave, cioè al di sotto del baricentro iniziale della stessa, si ha in conseguenza un effetto negativo sulla stabilità.

Se l'incaglio non ha provocato falla, né menomato la resistenza strutturale della nave, si può procedere al disincaglio, dopo essersi assicurati che la stabilità residua della nave lo consenta, (eventualmente abbassando dei pesi o sbarcandone altri).

Le operazioni di disincaglio possono essere effettuate con le eliche della nave, con il tiro di rimorchiatori o di argani e verricelli previo sbarco o spostamento di pesi nelle zone opportune o con l'impiego dei “cilindri di spinta” (contenitori posti lateralmente allo scafo e collegati tra loro con opportune catene o braghe allo scopo di fornire una spinta suppletiva).

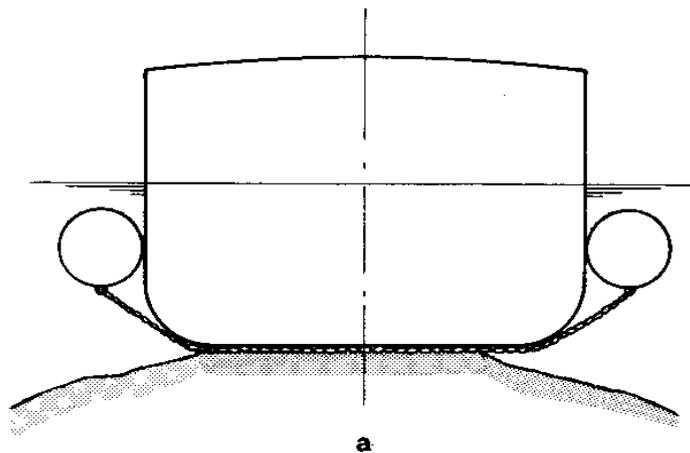


Fig. 0.6

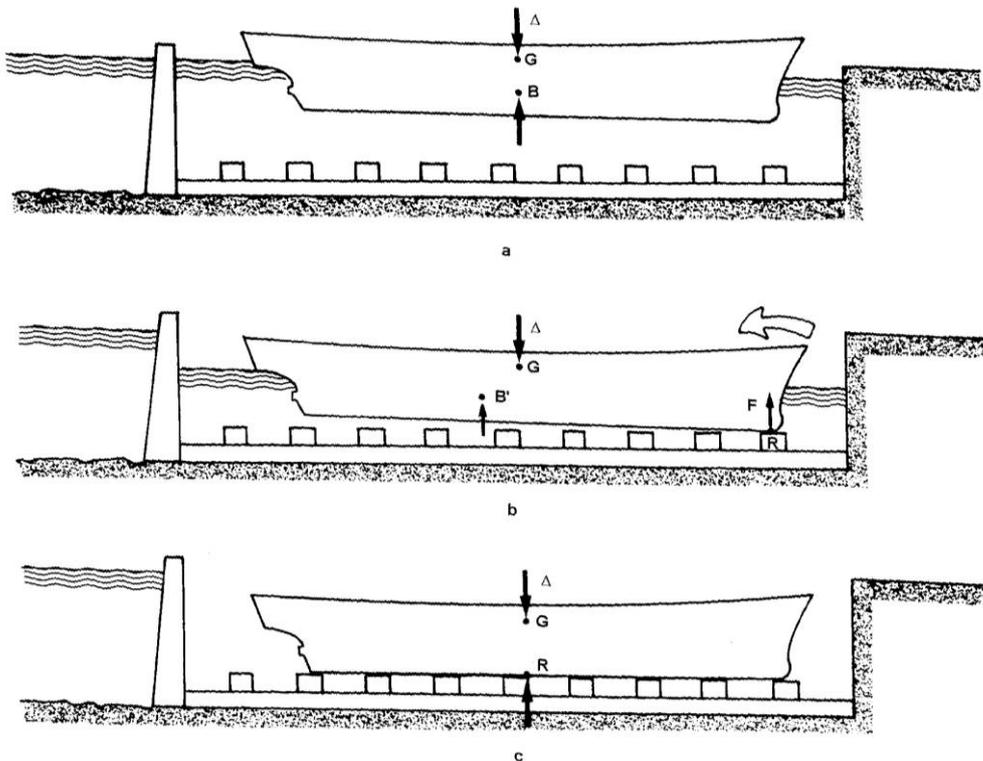
Immissione in bacino

Si tratta dell'operazione di messa a secco della nave (per carenamento, controlli e manutenzioni varie) durante la fase iniziale della quale si riproducono, volutamente e sotto controllo, le condizioni dell'incaglio, con i relativi problemi.

L'operazione avviene in tre fasi principali:

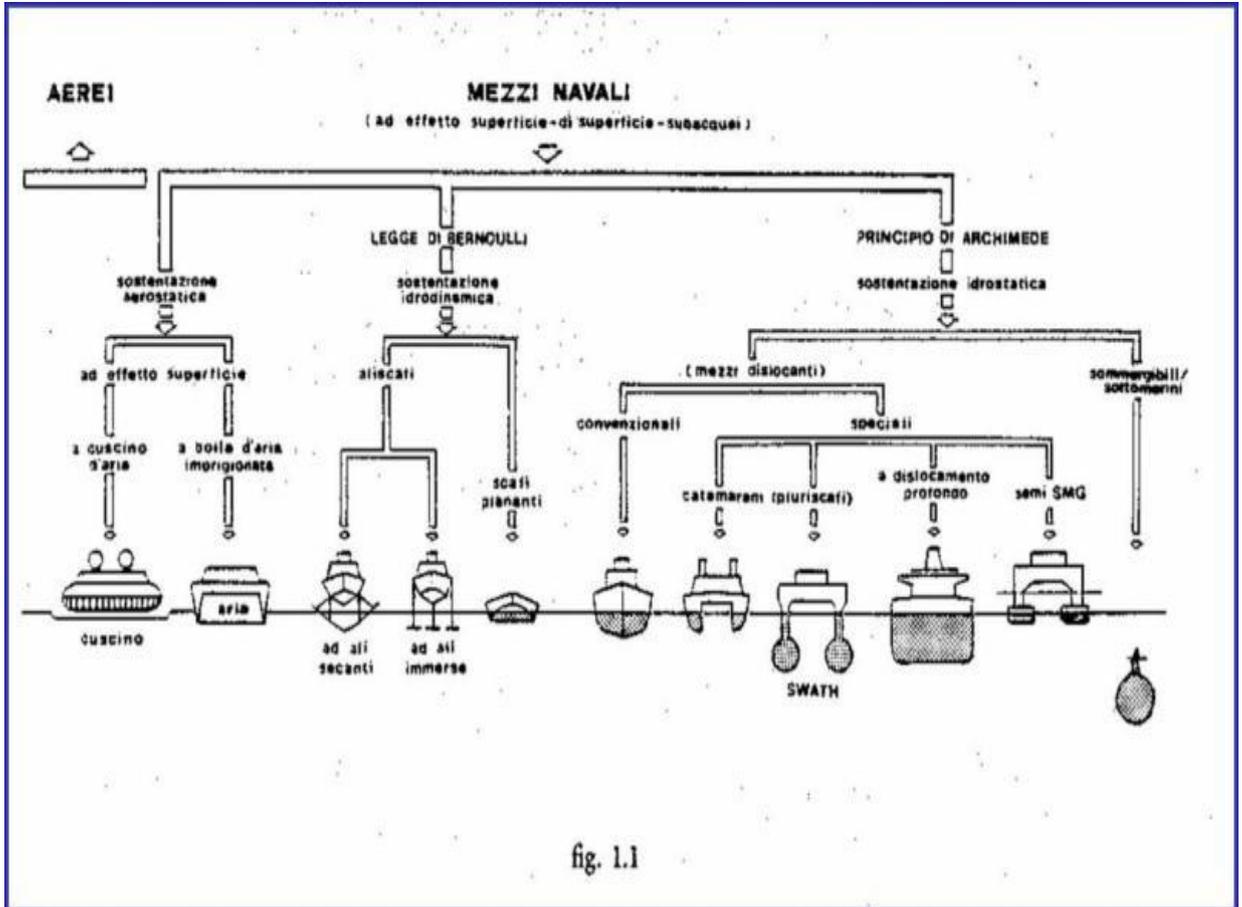
1. la nave a seguito dell'esaurimento dell'acqua all'interno del bacino si abbassa parallelamente a se stessa fino a toccare con una estremità il piano delle taccate;
2. la nave ruota attorno a tale estremità fino ad adagiarsi completamente sulle taccate (è questa la fase più critica nella quale si riproducono le condizioni dell'incaglio);
3. la nave ormai appoggiata per tutta la sua lunghezza sulle taccate è completamente a secco ed il bacino è prosciugato.

Per l'immissione della nave in bacino la nave dovrà essere scarica e asciutta e l'assetto longitudinale dovrà essere regolato in modo da rendere minima la rotazione sulle taccate poste nella platea del bacino assicurando comunque un minimo di appruamento alla nave.

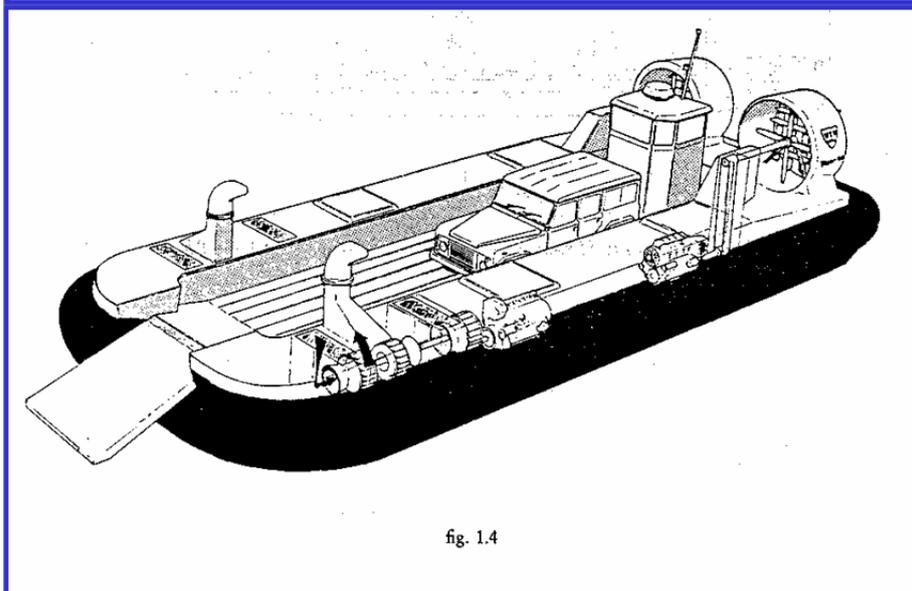
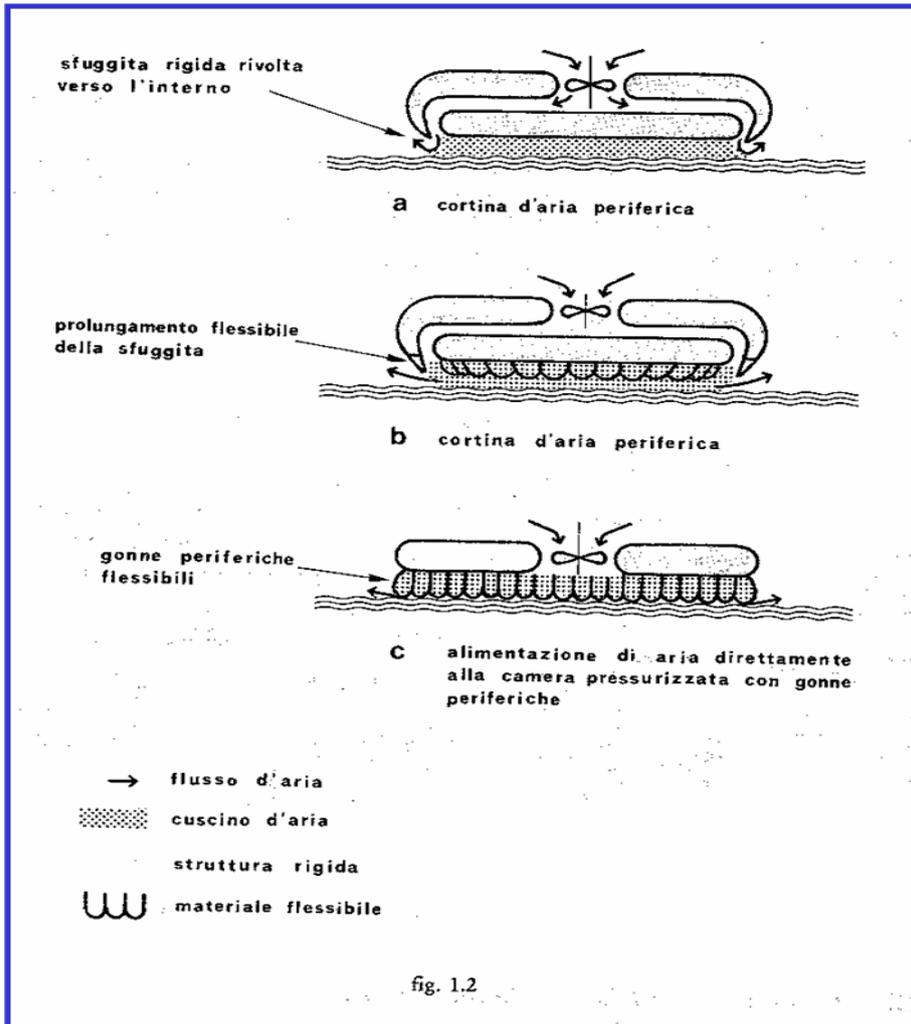


Tale condizione assicura che il primo punto di contatto avvenga nella zona prodiera (molto robusta) preservando la zona poppiera da urti accidentali che potrebbero danneggiare gli organi di propulsione e manovra (eliche e timoni).

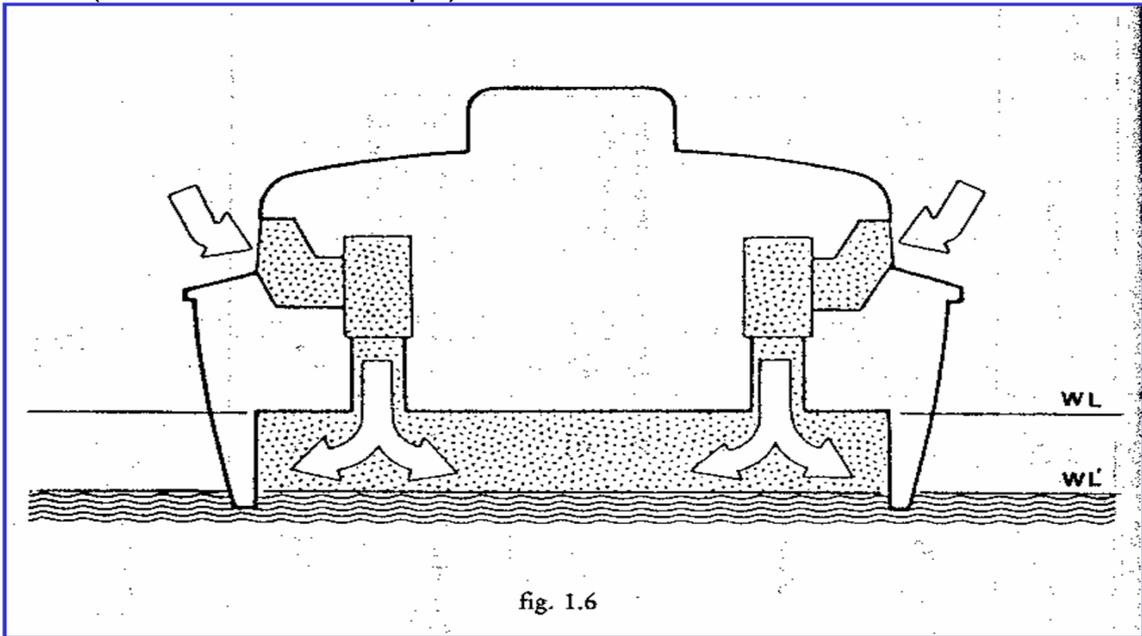
Suddivisione dei mezzi navali in base al sistema di sostentamento



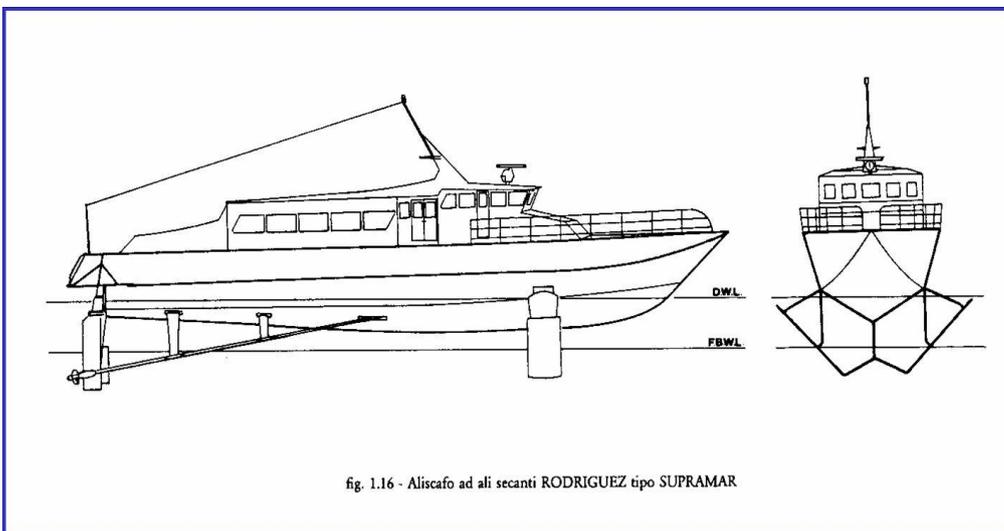
Mezzi a sostentamento aerostatico



SES (Surface Effect Ships)



Mezzi a sostentamento idrodinamico



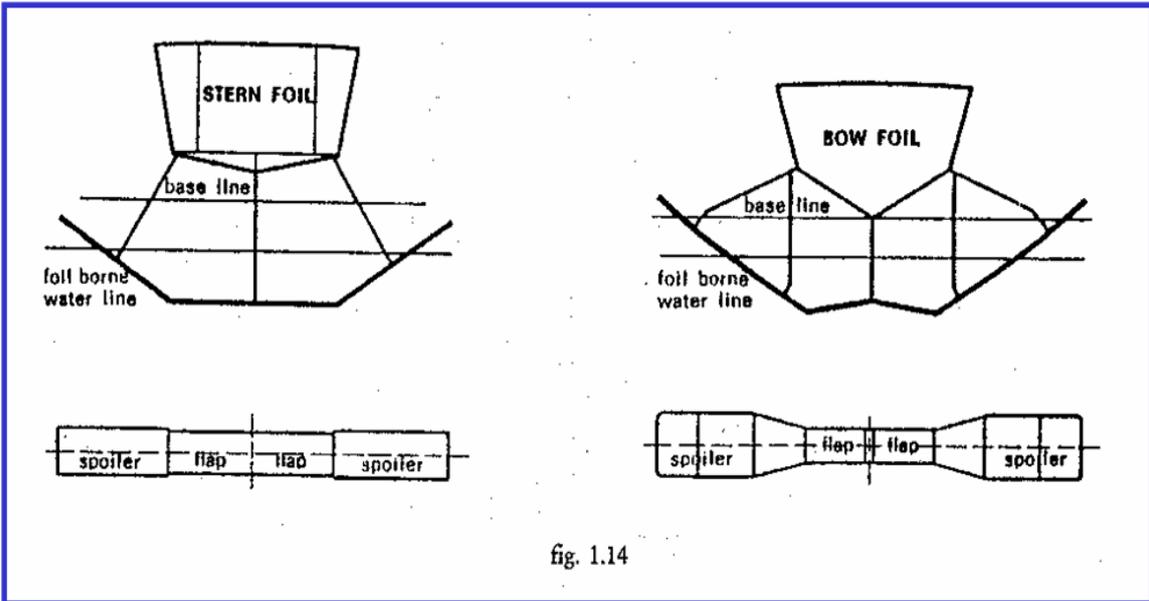


fig. 1.14

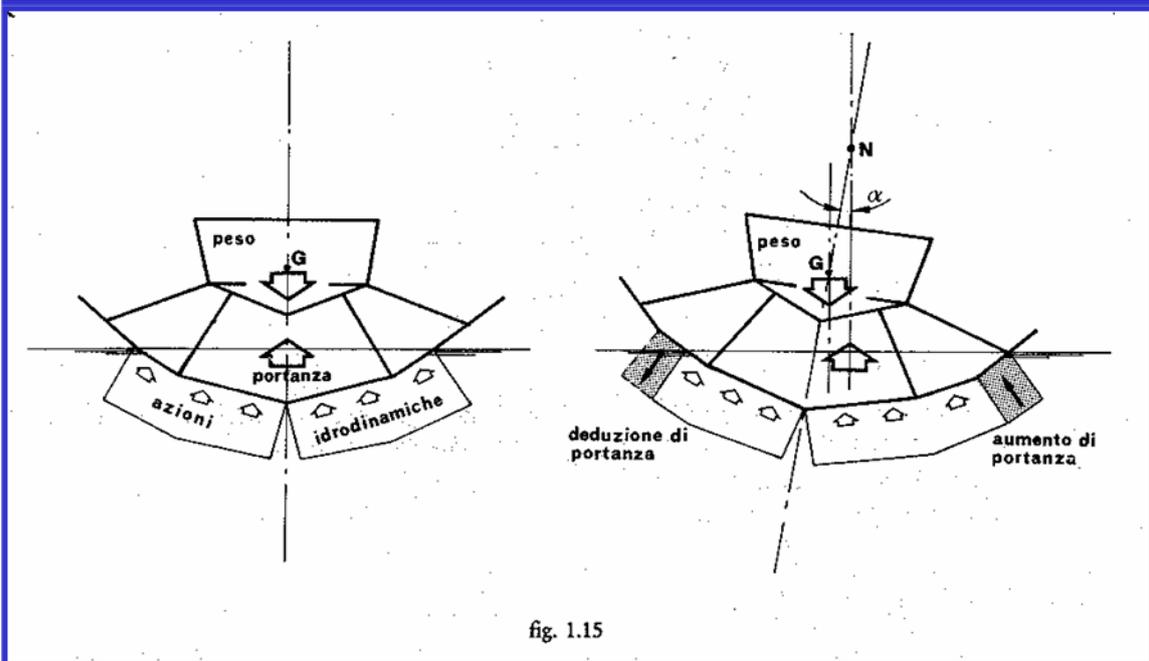
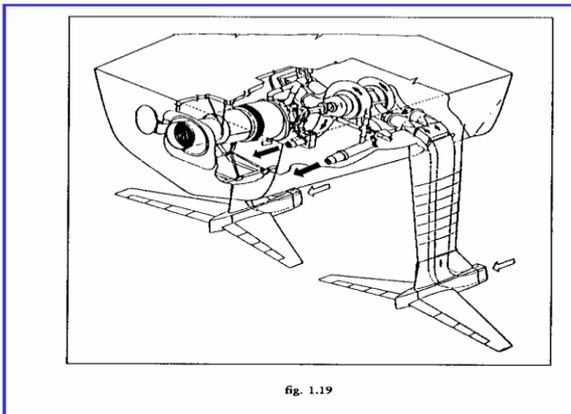
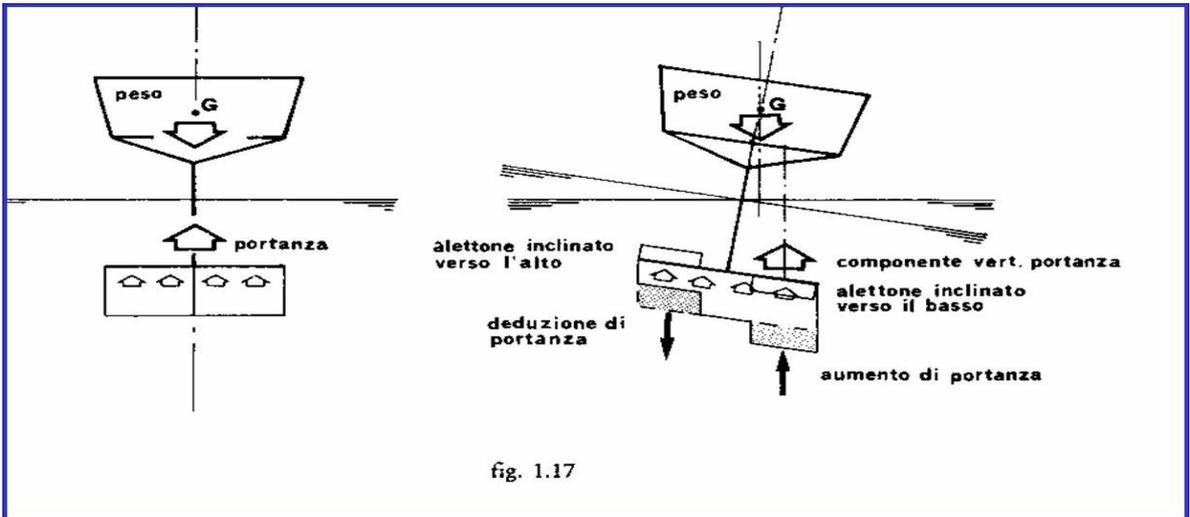
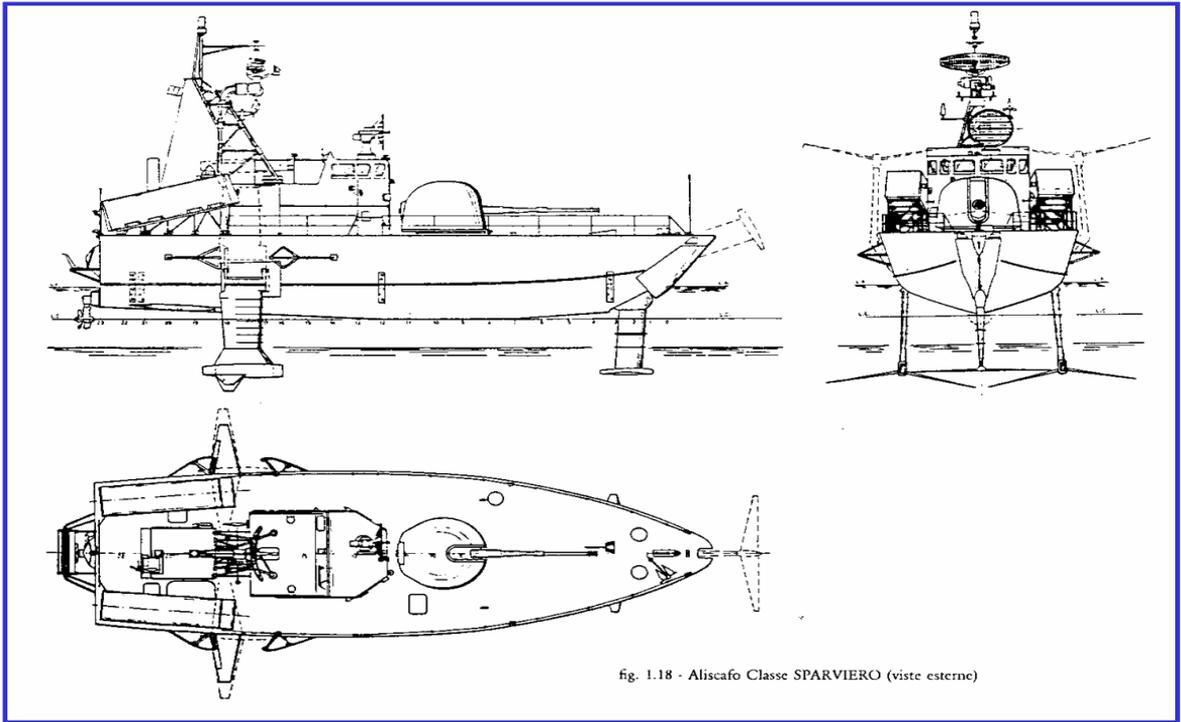


fig. 1.15



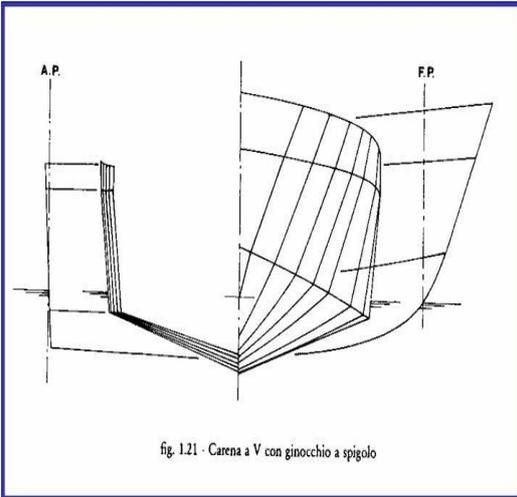


fig. 1.21 - Carena a V con ginocchio a spigolo

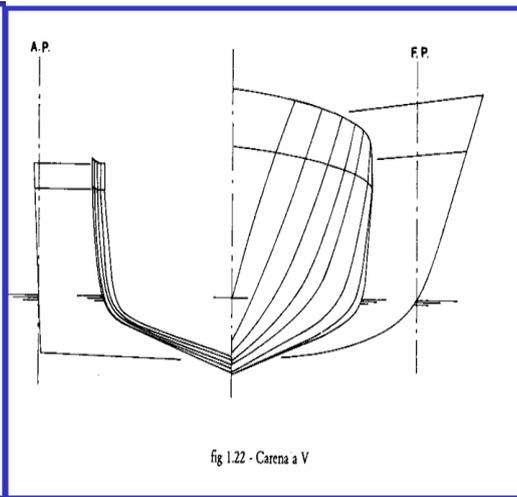


fig 1.22 - Carena a V

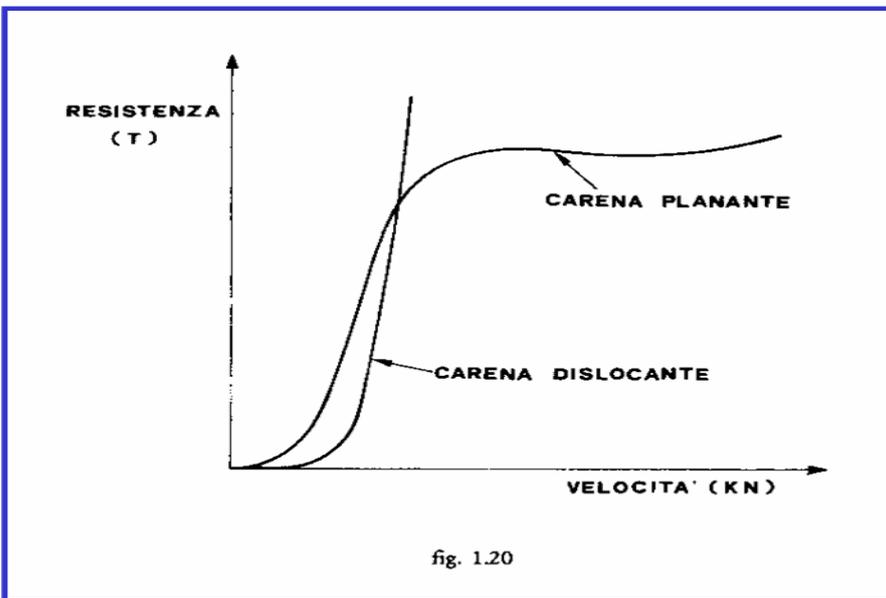
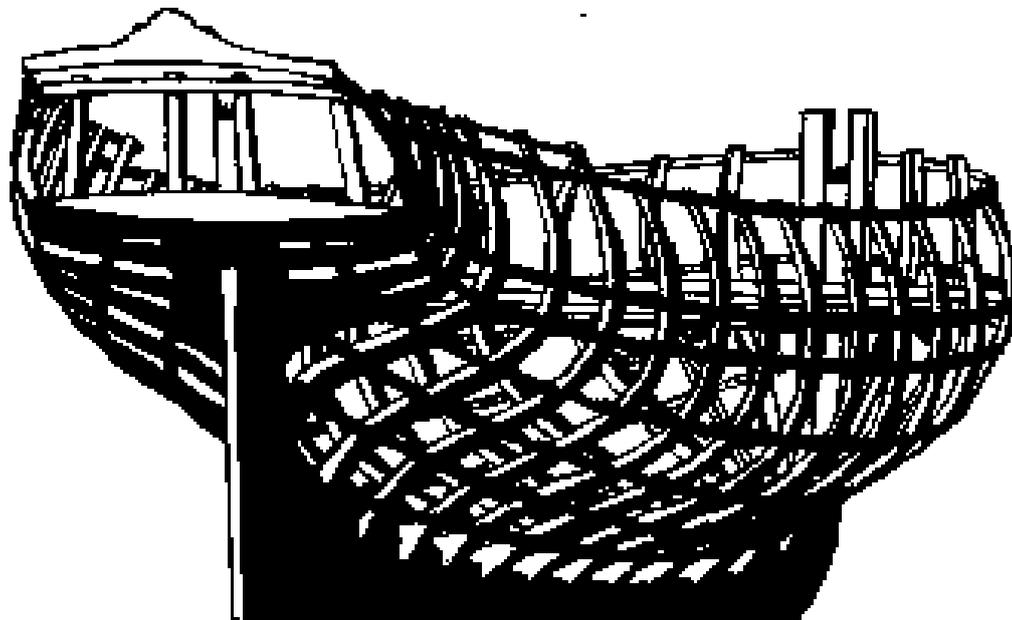


fig. 1.20

CENNI SULLA STRUTTURA DELLE NAVI IN LEGNO

Il legno è stato da sempre il materiale da costruzione navale per eccellenza e ciò nonostante la forte concorrenza degli acciai, delle leghe leggere e dei materiali compositi.

Si dà una descrizione delle varie parti che costituivano la struttura delle navi in legno del passato, in quanto la terminologia di gran parte degli elementi è comune anche alla struttura delle navi costruite in ferro.



Chiglia

La chiglia delle navi in legno è un grosso trave, ordinariamente di rovere, che si estende da una estremità all'altra della nave. Non potendo aversi di un sol pezzo, si costruisce in diverse parti, unite mediante palelle o impalellature.

Sulle tracce della chiglia sono praticate due scanalature a sezione triangolare, dette batture, nelle quali vanno ad incastrarsi le prime tavole del fasciame.

Al disotto della chiglia è aggiunto quasi sempre un pezzo a sezione rettangolare, detto falsa chiglia che si estende per tutta la lunghezza dello scafo e serve per proteggere la chiglia in caso di urto.

Ossature

Trasversalmente alla chiglia, sono fissate le ossature o costole, pezzi ricurvi che assicurano la robustezza trasversale e servono di appoggio ai fasciami.

Una ossatura si compone di diversi pezzi distribuiti in due piani o ordini, l'uno addossato all'altro e riuniti per mezzo di perni e di caviglie. Il primo ordine di pezzi comprende un pezzo centrale chiamato madiere ed una serie di scalmi che vengono indicati con le serie dei numeri dispari così a dritta come a sinistra del madiere.

I pezzi del secondo ordine comprendono due ginocchi ed una serie di scalmi indicati con la serie dei numeri pari così a dritta come a sinistra del piano di simmetria.

L'intervallo fra due ordinate successive si chiama maglia. Man mano che dall'ordinata maestra si procede verso prora e verso poppa, le sezioni trasversali della nave diventano sempre più stellate, e quindi per formare i madieri delle ordinate estreme si richiedono pezzi biforcati, chiamati forcacci.

Paramezzale

Il paramezzale è un trave a sezione rettangolare, situato nel piano longitudinale, esteso

da poppa a prora e sovrapposto a tutti i madieri. Insieme alla chiglia, a cui è strettamente collegato mediante lunghi perni, concorre efficacemente alla resistenza alle sollecitazioni longitudinali e locali dello scafo.

In navi di dimensioni rilevanti, si rinforza il paramezzale con altri due travi longitudinali, situati accanto ad esso, che prendono il nome di paramezzali laterali. Talvolta si sovrappone ancora al paramezzale centrale un altro trave detto sopraparamezzale.

Ruota di prora - Massiccio di prora

La ruota di prora è una trave a sezione rettangolare, che si collega con l'estremità prodiera della chiglia, raccordandosi a questa con un pezzo curvo detto brione o piè di ruota.

A poppavia della ruota vi è la controruota, collegata alla controchiglia mediante un bracciolo e quando vi è un sopraparamezzale, questo si prolunga sino ad incontrare un secondo bracciolo addossato alla controruota.

Fra il paramezzale e la chiglia si mettono uno o più pezzi di riempimento; tutti questi pezzi, che complessivamente formano il massiccio di prora, sono uniti tra loro mediante palelle.

I pezzi curvi debbono avere le fibre già disposte naturalmente lungo l'asse del pezzo, e quindi essere ricavati da tronchi naturali già curvi (corbami).

Dritto di poppa - Massiccio di poppa

Il dritto di poppa è costituito da un trave a sezione rettangolare intestato, leggermente inclinato, sull'estremità poppiera della chiglia. Il suo estremo inferiore termina con un minciotto a forma di dente che si incastra in un corrispondente foro praticato nella chiglia.

Il massiccio di poppa è simile a quello di prora.

L'estremità poppiera della chiglia è detta calcagnolo. L'unione della chiglia con il dritto di poppa è resa più robusta per mezzo di un bracciolo impalellato con una controchiglia e con un controdrutto.

Bagli - Trincarini - Dormienti - Suola - Puntelli

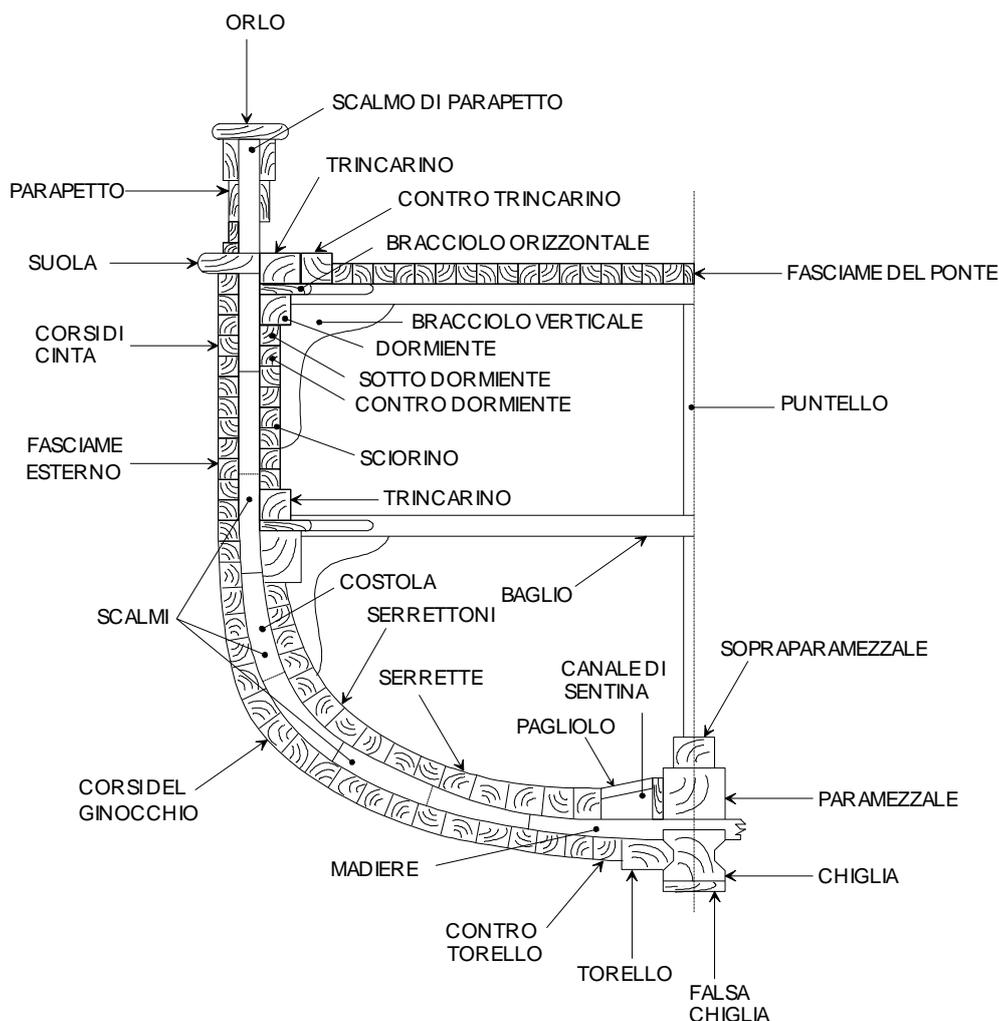
All'altezza dei vari ponti, le ossature sono collegate tra di loro mediante due o tre pezzi longitudinali sovrapposti detti dormiente, sottodormiente, contro dormiente.

Ai dormienti si collegano, mediante incastri, i bagli che sono travi leggermente arcuati con una freccia, detta bolzone, uguale a circa 1/50 della larghezza.

Al disopra dei bagli, e ad essi incastrati, corrono in direzione longitudinale il trincarino ed il controtrincarino.

Dal lato esterno del trincarino del ponte più alto, si appoggia sulla testa delle ossature, a loro protezione, una tavola corrente longitudinalmente che prende il nome di suola.

Per aiutare i bagli a resistere al peso del ponte e dei carichi che questo sopporta, si dispongono al disotto di essi travi verticali detti puntelli.



Fasciame esterno

Lo scheletro del bastimento viene rivestito esternamente mediante corsi di tavole disposte longitudinalmente. La linea d'unione fra un corso e l'altro dicesi comento. Tra i vari corsi costituenti il fasciame esterno ve ne sono alcuni che, nei riguardi della robustezza strutturale, hanno importanza maggiore degli altri. A questi corsi, che vengono costruiti di maggior grossezza, si danno nomi speciali. Si chiamano così:

- * Torelli i corsi inferiori che vanno ad incastrarsi nelle batture della chiglia
- * Controtorelli i corsi immediatamente adiacenti ai torelli
- * Cinte i corsi di murata, in prossimità del ponte superiore
- * Corsi del ginocchio i corsi che corrispondono ai punti di massima curvatura delle ordinate.

La murata è completata, al disopra della cinta e del trincarino, dalla impavesata. L'impavesata prende anche il nome di parapetto, ed è costituita da una serie di montanti detti scalmi di parapetto che superiormente terminano con un dente che si incastra in un filare detto orlo. Per conferire maggior rigidità di forma alla struttura dello scafo, si ricorre talvolta al fasciame incrociato, costituito da tre strati, di cui il più interno è disposto a 45 gradi rispetto alle costole, il secondo disposto normalmente al primo, ed il terzo, che è quello di maggior spessore, disposto longitudinalmente. Fra l'uno e l'altro, fogli di materiale stagno (strato di tela o feltro incatramati o altri equivalenti). La maggior rigidità attendibile con i fasciami incrociati, può consentire un maggior distanziamento delle costole.

Sempre per ottenere un maggior irrigidimento dello scafo, si possono sistemare delle

diagonali, che sono legamenti la cui funzione è analoga a quella che si potrebbe avere con una diagonale aggiunta ad un parallelogramma articolato, per renderlo indeformabile. Le diagonali possono essere di legno o di metallo (ferro zincato, rame, bronzo, ecc.). Ad esempio, nei dragamine amagnetici della nostra Marina Militare, sono costituite da bronzo al silicio, e sono poste a 45° sulle costole, a distanza variabile (2 * 3 metri).

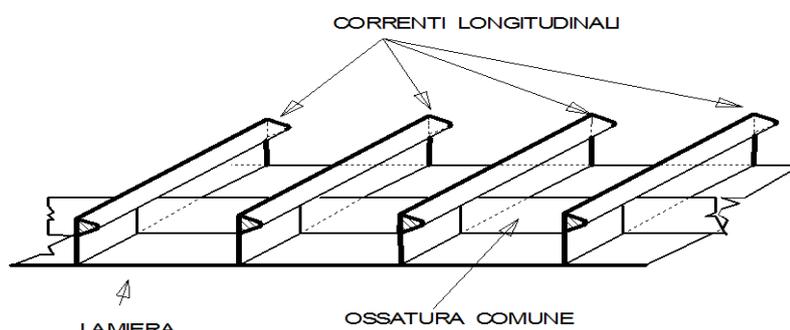
Fasciame interno

Tutta la parte interna dello scafo è generalmente rivestita con tavole disposte longitudinalmente che prendono il nome di serrette. Il primo corso inferiore di tali tavole non è però posto a contatto con il paramezzale ma ne dista di circa mezzo metro per formare il canale di sentina ove va a raccogliersi l'acqua che viene aspirata ed espulsa con apposite pompe di sentina; tale canale viene ricoperto con tavole mobili che formano il pagliolato.

I corsi di serrette che capitano ad incrociare le teste dei madieri e dei primi scalmi, hanno grossezza maggiore e si chiamano serrettoni. La serretta mobile per l'aerazione tra fasciame interno ed esterno si chiama sciorino.

Le strutture navali in acciaio

Per sopportare i carichi cui è soggetta, la nave presenta una struttura formata da pannelli di lamiera saldata, irrigiditi da travi e profilati di vario genere, a costituire un insieme di telai trasversali e longitudinali.



Le lamiere ed i rinforzi che formano i telai trasversali, costituiscono una struttura resistente alle sollecitazioni prevalentemente trasversali.

I telai longitudinali, invece, conferiscono allo scafo metallico la necessaria rigidità nei confronti di carichi longitudinali sia in acqua tranquilla che sull'onda.

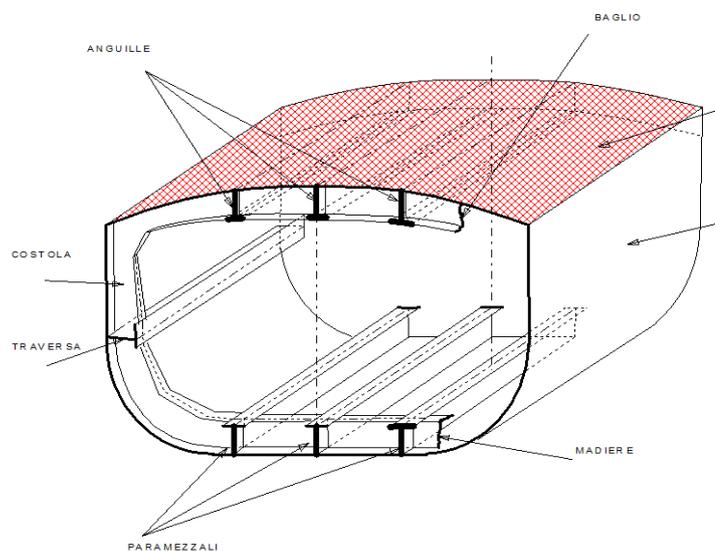
Per quanto detto è chiaro che la tipologia strutturale di una nave non sarà mai solo di tipo trasversale o longitudinale, ma saranno presenti entrambi i telai. A seconda del tipo di sollecitazioni prevalenti avremo una maggiore o minore presenza di telai trasversali o longitudinali; in particolare si possono riscontrare tre tipologie strutturali:

- struttura “prevalentemente” **trasversale**;
- struttura “prevalentemente” **longitudinale**;
- struttura **mista**.

Oltre a questo, per ogni tipologia strutturale si possono individuare due tipi di elementi di rinforzo:

- **travi principali**: dette anche “rinforzi primari” o “travi rinforzate”; offrono la resistenza alle sollecitazioni principali cui è soggetta la nave e garantiscono la continuità strutturale;

- **travi ordinarie:** dette anche “rinforzi secondari”, conferiscono la robustezza locale e fanno da irrigidimento ai pannelli di lamiera del fondo, dei fianchi e dei ponti; questi, inoltre ripartiscono il carico gravante sulle travi principali.



Struttura prevalentemente trasversale

Tale struttura si adotta su navi di ridotte dimensioni che non presentano elevate sollecitazioni longitudinali, ma principalmente problemi di robustezza trasversale e locale.

La struttura dello scafo è costituita da un insieme di telai trasversali costituiti da:

- **madiere:** lamiera o profilato a T di rinforzo del fondo;
- **costola:** profilato a bulbo o ad L di rinforzo del fianco;
- **baglio:** profilato a bulbo o ad L di sostegno del/dei ponti.

Tali telai sono posti ad opportuna distanza tra loro, detta **intervallo di ossatura**; ogni 3÷5 intervalli di ossatura viene inserita una ossatura rinforzata costituita da travi primarie.

In senso longitudinale vi sono solo travi principali a costituire telai rinforzati per conferire alla nave la necessaria robustezza flessionale.

I vari elementi sono opportunamente collegati fra loro mediante squadre o strutture di raccordo.

Le ossature rinforzate sono caratterizzate dagli stessi elementi, ma di dimensioni maggiori (generalmente travi a T) che prendono il nome di:

- madiere rinforzato;
- costola rinforzata;
- baglio rinforzato.

Longitudinalmente si hanno:

- travi di rinforzo del fondo detti **paramezzali**;
- del ponte dette **anguille**.

In funzione della larghezza nave si possono avere più di una di queste travi rinforzate avendo così un paramezzale ed una anguilla centrale e uno o più paramezzali e anguille

lateralì. Queste travi si raccordano con gli elementi rinforzati verticali delle paratie stagne della nave, montanti rinforzati, a costituire uno o piú anelli longitudinali.

Struttura prevalentemente longitudinale

L'esigenza di una struttura prevalentemente longitudinale nasce come conseguenza dell'aumento delle dimensioni ed in particolare della lunghezza della nave.

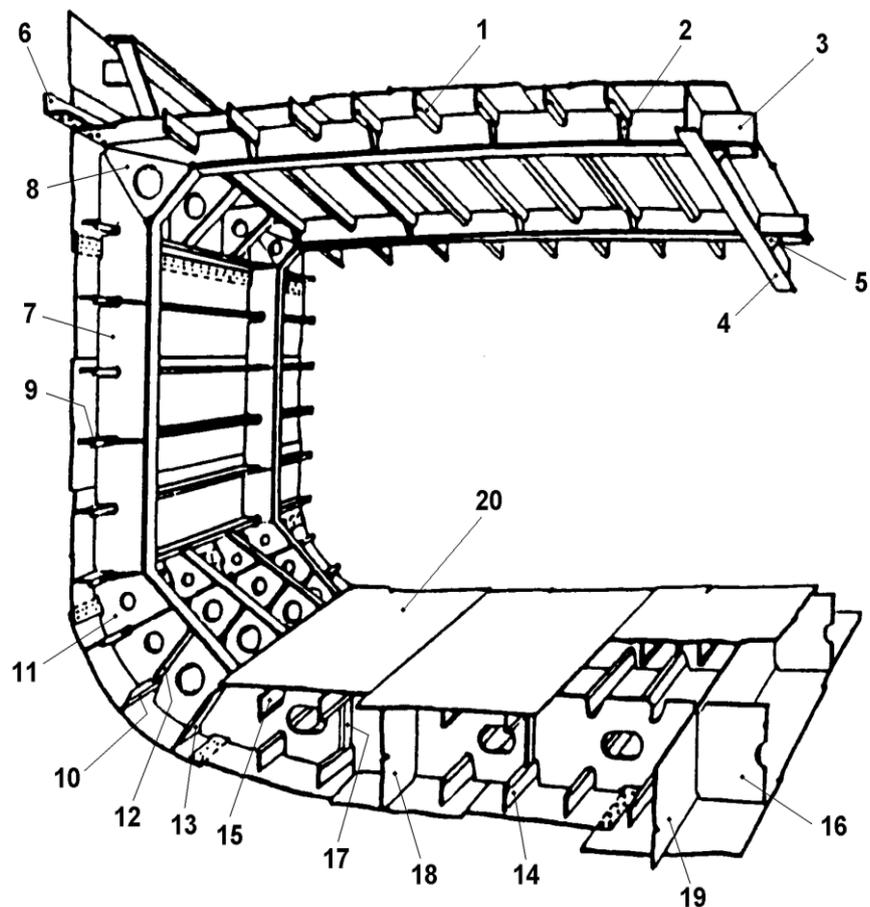
Le maggiori sollecitazioni di flessione longitudinale necessitano di un maggior numero di elementi strutturali che possano sopportare detti sforzi. La soluzione di adottare una struttura prevalentemente trasversale con un infittimento degli elementi longitudinali primari, presenta lo svantaggio di risultare assai pesante e di fatto inaccettabile. Nasce così una struttura con rinforzi ordinari longitudinali e solo ossature rinforzate, caso tipico delle navi cisterna.

La struttura ha come travi secondarie dei profilati posti longitudinalmente:

- **correnti** del fondo;
- **correnti** del cielo del doppio fondo (se presente);
- **correnti** del fianco;
- **correnti** del ponte.

Sempre in senso longitudinale si hanno un paramezzale ed una anguilla centrale ed uno o piú paramezzali e anguille laterali come travi rinforzate. Trasversalmente, ogni 4÷5 intervalli di ossatura sono sistemate le ossature rinforzate costituite da elementi rinforzati.

Oggi la maggior parte delle navi è realizzata con questo tipo di struttura, fermo restando l'adozione della struttura trasversale in quelle zone della nave dove maggiori sono i carichi trasversali e concentrati (gavone di prua, gavone di poppa, locali destinati all'Apparato Motore).



Sezione maestra di nave a struttura longitudinale con doppio fondo.

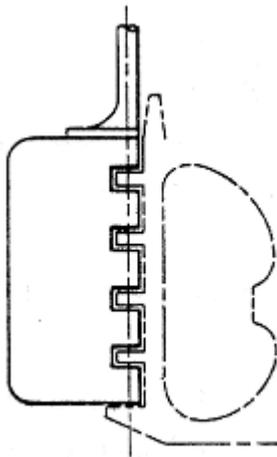
- | | |
|--|---|
| 1 - corrente del ponte | 13 - lamiera esterna marginale |
| 2 - squadrette di collegamento del corrente con il baglio rinforzato | 14 - corrente del fondo |
| 3 - baglio rinforzato | 15 - corrente del cielo del doppio fondo |
| 4 - anguilla | 16 - madiere piano |
| 5 - squadretta di collegamento del baglio rinforzato con il ponte | 17 - barrotto di irrigidimento del madiere e di collegamento dei correnti con il madiere stesso |
| 6 - angolare di trincarino | 18 - paramezzale laterale |
| 7 - costola rinforzata | 19 - paramezzale centrale |
| 8 - squadra di collegamento della costola rinforzata con il baglio rinforzato | 20 - fasciame del cielo del doppio fondo |
| 9 - corrente di murata | |
| 10 - corrente di ginocchio | |
| 11 - squadra esterna marginale (collega la costola rinforzata con la lamiera del doppio fondo) | |
| 12 - barrotto di irrigidimento della squadra esterna marginale | |

Governo e evoluzione delle navi

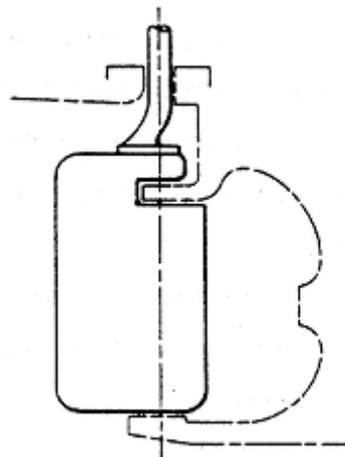
Gli organi di governo sono sistemazioni atte a modificare o conservare una certa direzione della nave. Essi possono essere convenzionali e non convenzionali; l'organo di governo convenzionale per eccellenza è il timone, costituito da una lastra ideale piana che può ruotare intorno ad un asse verticale. Esso è disposto nella zona poppiera della nave, a poppavia del propulsore.

I timoni possono essere classificati in funzione dei seguenti elementi :

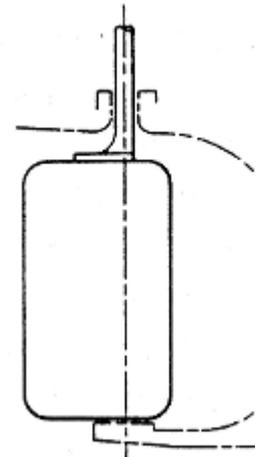
- * Forma
- * Posizione dell'asse di rotazione
- * Realizzazione costruttiva
- * Collegamento strutturale allo scafo



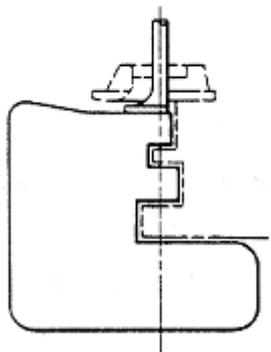
Timone a Dritto



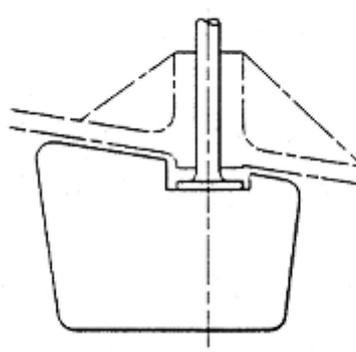
**Simplex
ad un agugliotto**



**Simplex
senza agugliotti**



**Semicompensato
a due agugliotti**



**Semicompensato
a spada**

Per la forma abbiamo timoni rettangolari , trapezoidali e composita.

Relativamente all'asse di rotazione , l'area investita dal fluido può essere :

- tutta a poppavia dell'asse (timone ordinario)
- distribuita in parte a proravia ed in parte a poppavia dell'asse (timone compensato)
- distribuita , a proravia dell'asse, non lungo tutta l'altezza del timone (timone semicompensato)

Il rapporto tra l'area a proravia e l'intera area si chiama grado di compensazione. Il motivo della compensazione è da ricercarsi nella necessità di limitare il momento torcente fornito dalla macchina del timone evitando però che il timone diventi instabile.

Dal punto di vista costruttivo i timoni sono tutti a doppia lamiera , sagomati secondo un profilo alare simmetrico anziché a semplice lamiera come nelle vecchie costruzioni.

Il collegamento strutturale può essere realizzato :

- solo con la barra (timone sospeso)
- mediante uno o più perni detti agugliotti che ruotano dentro alloggiamenti dette femminille e da un appoggio di piede detto calcagnolo (timone appoggiato)

L'apertura posta sulla volta di poppa attraverso la quale passal'asse del timone si chiama losca; la tenuta stagna viene realizzata mediante un pressatreccie; l'asse del timone tramite sistema di collegamento al reggispinga prende il movimento dalla macchina del timone situata nel locale "agghiaccio".

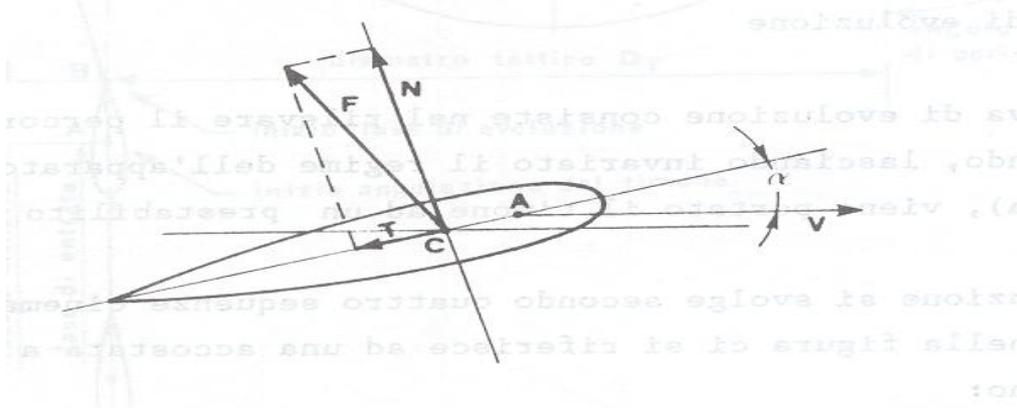
Come abbiamo detto, i timoni odierni non sono delle semplici lastre piane, ma dei profili alari simmetrici onde ottimizzare l'andamento delle pressioni sul dorso e sulla faccia del timone stesso.

Nota la forza F , generata dalla differenza delle pressioni agenti sulle due facce del profilo, volendo calcolare il momento da fornire all'asse del timone per mantenerlo inclinato dell'angolo α , conviene

scomporre la forza F nelle due componenti

:- N , normale all'asse di simmetria del profilo;

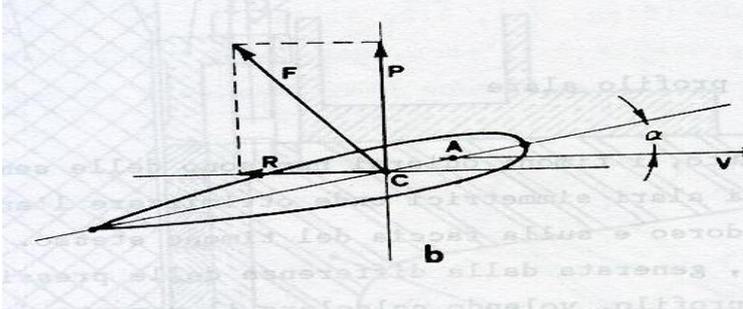
- T , secondo l'asse di simmetria del profilo.



La componente tangenziale T tende a strappare il timone dall'asse nella direzione del timone stesso (occorre perciò che l'asse sia opportunamente dimensionato); mentre la componente normale N , moltiplicata per il relativo braccio CA (A è l'asse del timone), dà appunto il "momento da considerare nei calcoli per la determinazione della potenza della macchina del timone.

Quando si vuole studiare l'effetto evolutivo del timone sulla nave si prendono in esame le seguenti componenti :

- Portanza P , normale al piano diametrale;
- Resistenza R , lungo l'asse longitudinale.



Prova di evoluzione

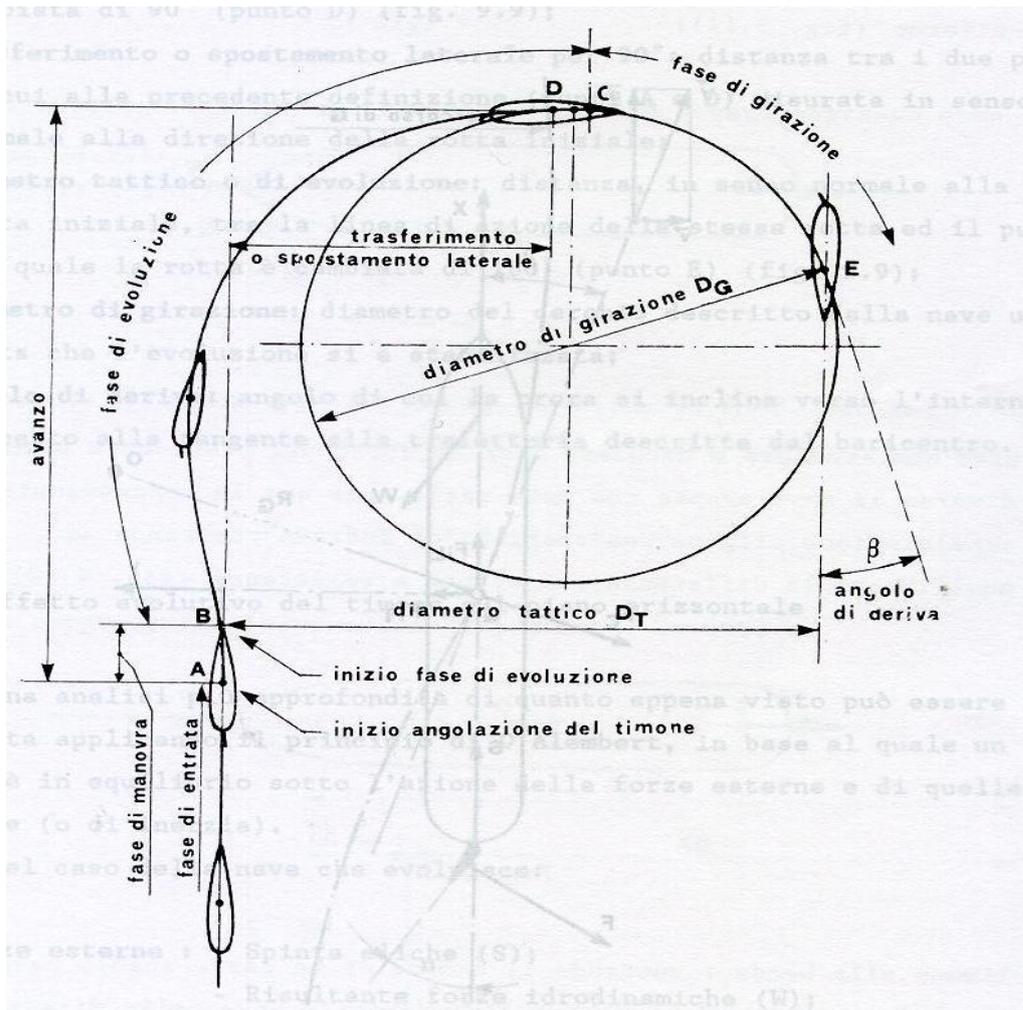
La prova di evoluzione consiste nel rilevare il percorso che compie la nave quando, lasciando invariato il regime dell'apparato motore (cioè i giri elica), viene portato il timone ad un prestabilito angolo di barra. L'evoluzione si svolge secondo quattro sequenze cinematiche diverse, e nella figura ci si riferisce ad una accostata a destra; tali sequenze sono:

-Fase di entrata: si fa avanzare la nave su una rotta rettilinea a regime costante dei giri delle eliche operando sul timone con poca barra in modo da mantenere la rotta. Tale fase dura per un tempo

sufficiente ad assicurare che la velocità sia uniforme.

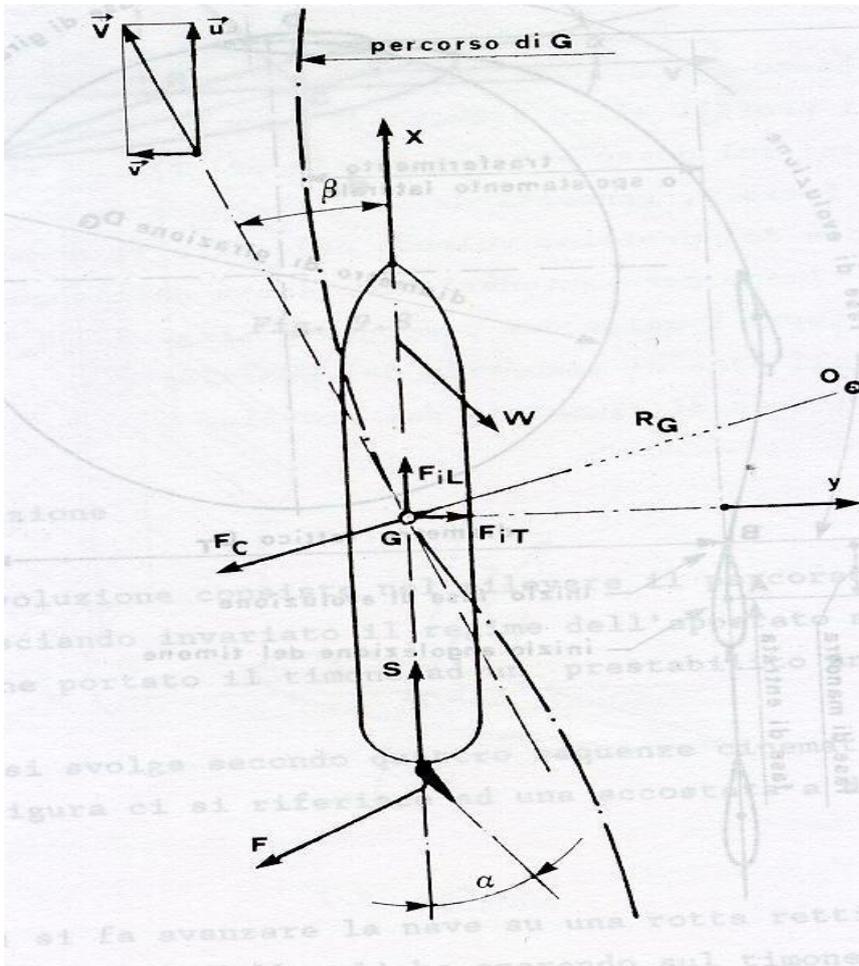
-Fase di manovra: comincia nel punto A , nell'istante in cui il timone inizia la sua rotazione e dura tutto il tempo per cui l'angolo di rotta resta invariato; orientativamente si può dire che questo tempo coincide con quello necessario per portare il timone all'angolo di barra prefissato. In questa fase la nave si sposta lateralmente, ma il momento evolutivo esercitato dal timone non ha

ancora raggiunto un valore tale da fare acquistare alla nave una velocità angolare.



Fase di evoluzione: in questa fase, che inizia nel punto B, la nave sotto l'azione delle forze esterne (forza F sviluppata dal timone, risultante W delle forze idrodinamiche agenti sulla carena, spinta S delle eliche) e delle forze interne (forza centrifuga F_c e forza di inerzia F_i) compie un percorso a spirale con centro di istantanea rotazione O variabile nel tempo e raggio di curvatura della traiettoria R_g sempre più piccolo. Sotto l'azione di queste forze la nave si orienta in modo da realizzare spontaneamente una nuova condizione di equilibrio dinamico alla traslazione laterale, alla rotazione intorno all'asse baricentrico Z e all'avanzo.

-Fase di girazione: raggiunta la nuova condizione di equilibrio nel punto D la nave prosegue la sua traiettoria con moto circolare uniforme, ovviamente se si mantengono costanti il numero di giri dell'elica e l'angolo di barra.~



Dalla prova di evoluzione si ricavano alcuni parametri caratterizzanti il moto della nave, che vengono così definiti:

- Curva di evoluzione: percorso descritto dal baricentro della nave nella prova di evoluzione;
- Avanzo: distanza misurata nella direzione della rotta iniziale tra il punto di inizio della manovra (punto A) ed il punto in cui la rotta è cambiata di 90° (punto D) ;
- Trasferimento o spostamento laterale per 90° : distanza tra i due punti di cui alla precedente definizione (punti A e D) misurata in senso normale alla direzione della rotta iniziale;
- Diametro tattico o di evoluzione: distanza, in senso normale alla rotta iniziale, tra la linea di azione della stessa rotta ed il punto nel quale la rotta è cambiata di 180° (punto E) ;
- Diametro di girazione: diametro del cerchio descritto dalla nave una volta che l'evoluzione si è stabilizzata;
- Angolo di deriva: angolo di cui la prora si inclina verso l'interno rispetto alla tangente alla traiettoria descritta dal baricentro.

Effetto evolutivo del timone sul piano orizzontale

Una analisi più approfondita di quanto appena visto può essere condotta applicando il principio di D'Alembert, in base al quale un corpo è in equilibrio sotto l'azione delle forze esterne e di quelle

interne (o di inerzia). Nel caso della nave che evolve:

-Forze esterne: -Spinta eliche (S);

-Risultante forze idrodinamiche (W);

-Forza del timone.

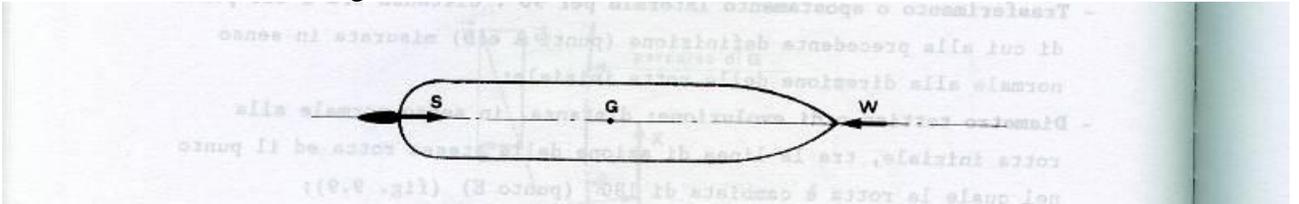
-Forze interne: -Forza di reazione o di inerzia della massa della nave e della massa di liquido trascinato (nasce in presenza di accelerazioni);

-Forza centrifuga, presente quando esiste anche una accelerazione angolare.

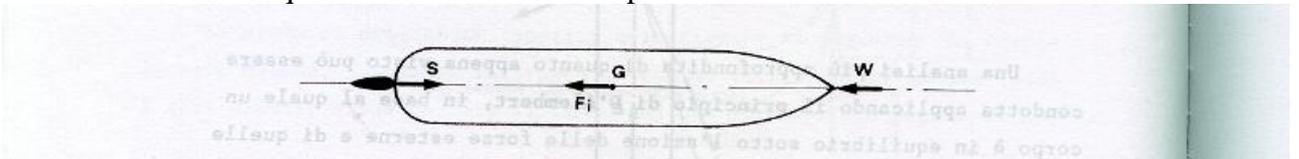
Il moto di una nave può essere esaminato considerando alcuni casi principali:

1) Nave che avanza con il timone al centro e velocità costante: le forze in gioco sono soltanto la spinta dell'elica e la spinta idrodinamica dell'acqua, che agiscono entrambe sul piano di

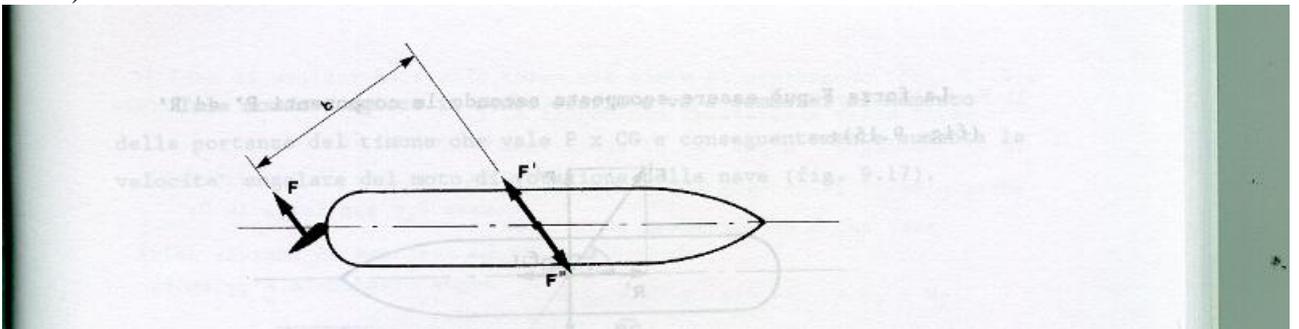
simmetria; tali forze sono uguali e la nave avanza di moto rettilineo uniforme;



2) Nave che accelera o decelera : se le forze del precedente caso sono diverse , la nave avanza con moto vario per cui la sopravvenuta accelerazione origina una reazione di inerzia che tende ad equilibrare la differenza tra spinta e resistenza.



3) Timone alla banda: ruotando il timone di un certo angolo nasce la forza F che determina una traslazione della nave nella direzione della forza stessa, e poichè la sua linea di azione non passa per il baricentro della nave ne determina anche una rotazione. Per studiare il comportamento della nave, supponiamo di far agire su G due forze uguali e contrarie di intensità F' ed F'' (il sistema di forze resta invariato); il tutto è equivalente alla forza F' applicata al baricentro della nave, più una coppia (generata dalle due forze F ed F'') di valore $M = F \times b$.



Il succitato valore del momento può anche essere espresso come .:

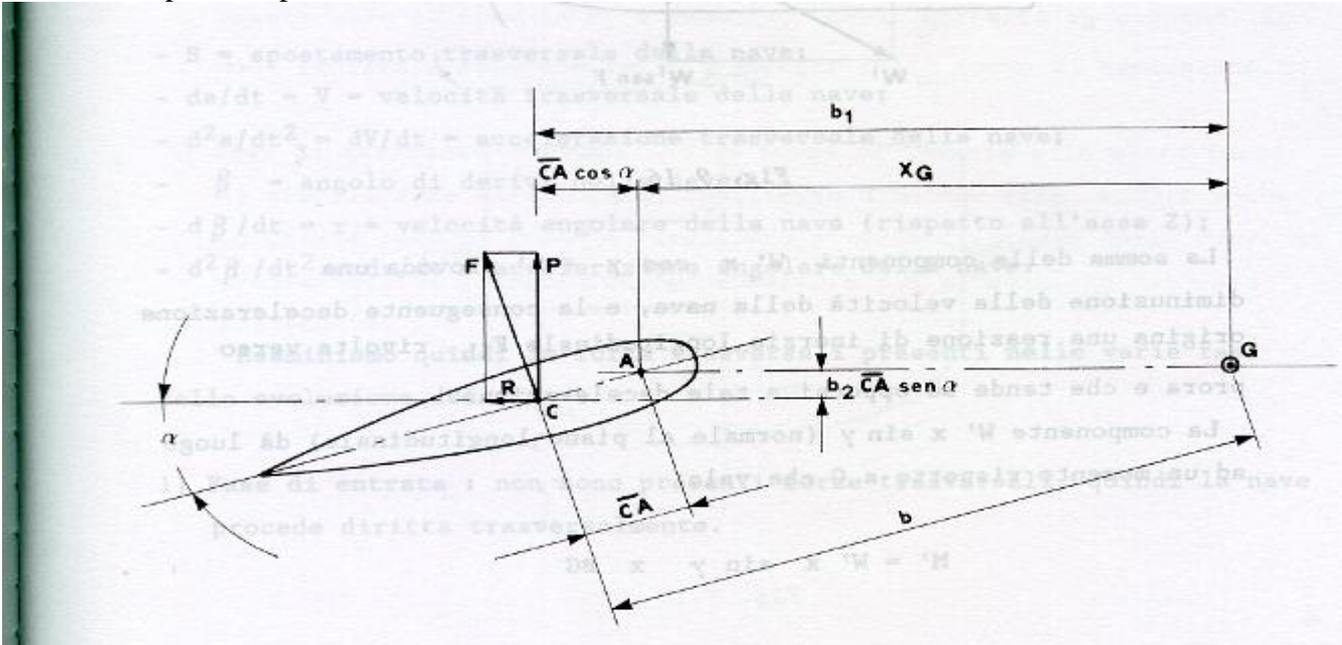
$$M = F \times b = p \times b_1 + R \times b_2$$

$$b_1 = XG + X C \times \cos \alpha$$

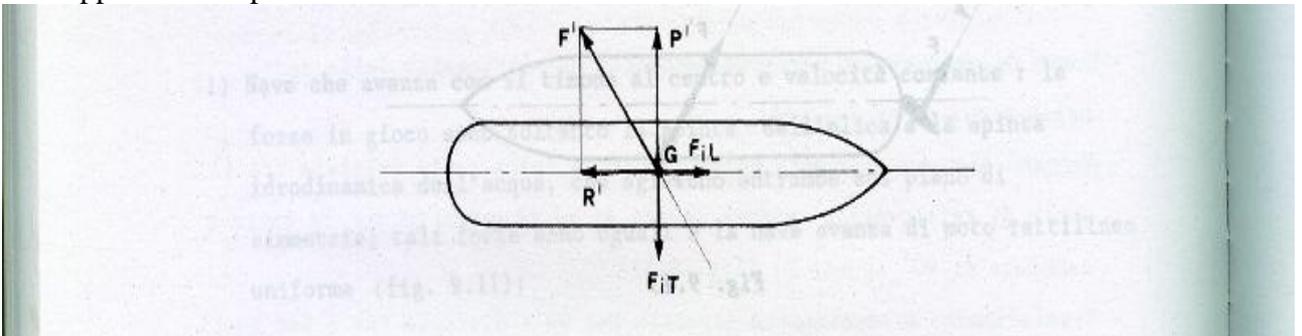
$$b_2 = X C \times \sin \alpha$$

dove: α circa 35° per banda, $X C$ circa O , $R \ll P$, per cui risulta infine:

$$M = F \times b = p \times b_1 = p \times CG$$

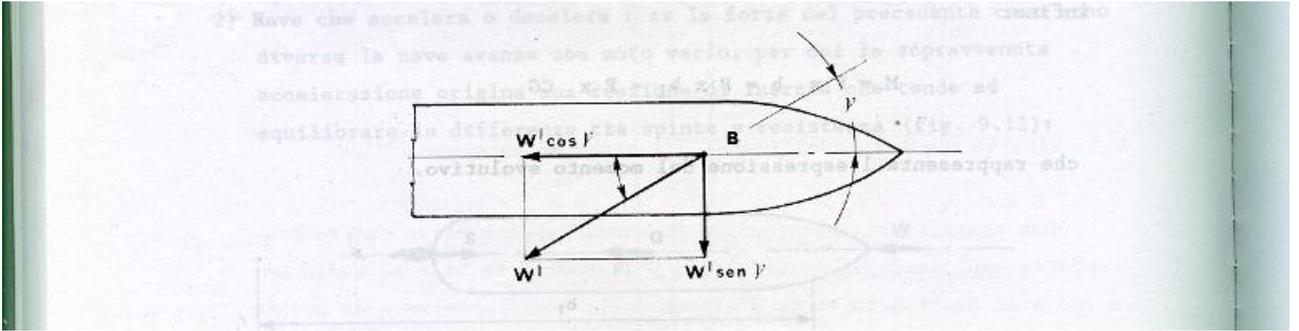


che rappresenta l'espressione del momento evolutivo.



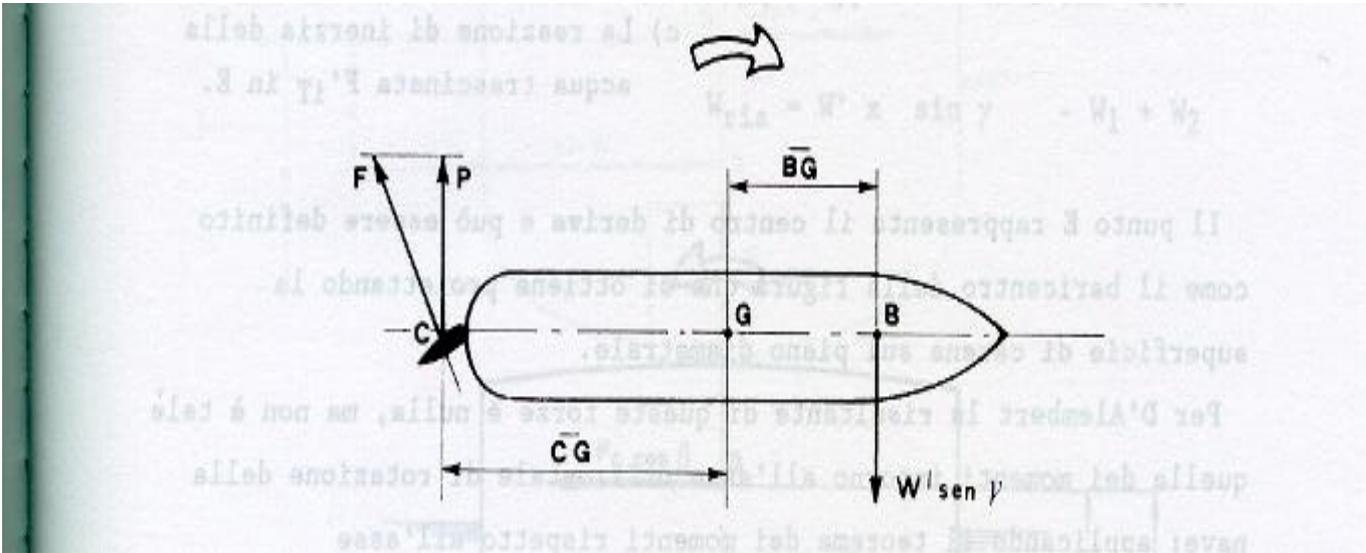
La forza F' può essere scomposta secondo le componenti P' ed R'

P' provoca un moto di deriva verso l'esterno con una certa accelerazione, e quindi una reazione di inerzia FiT che è diretta verso l'interno della traiettoria; la deriva è contrastata dalla componente trasversale crescente della resistenza idrodinamica W incontrata dalla nave, che per effetto del moto di deriva agisce in un punto B variabile ed è inclinata rispetto all'asse y di un angolo γ pure variabile .



La somma delle componenti nella direzioni della velocità provoca una riduzione della velocità stessa mentre le componenti normali provoca un momento .

Tale momento agisce in senso orario e va a sommarsi al momento della portanza del timone che vale $p \times CG$ e conseguentemente aumenta la velocità angolare del moto di rotazione della nave



Effetto evolutivo del timone sul piano verticale

Durante l'evoluzione la nave si inclina trasversalmente per effetto di vari momenti sbandanti; le inclinazioni che si raggiungono possono essere pericolose, specialmente per navi di piccolo dislocamento; si pone:

-s = spostamento trasversale della nave;

$-ds/dt = V$ = velocità trasversale della nave;

$ds^2/dt^2 = dV/dt$ = accelerazione trasversale della nave;

β = angolo di deriva della nave;

$d\beta/dt = r$ = velocità angolare della nave (rispetto all'asse Z);

$d^2\beta/dt^2 = dr/dt$ = accelerazione angolare della nave.

Esaminiamo quindi le forze trasversali presenti nelle varie fasi della evoluzione della nave:

1) Fase di entrata: non sono presenti forze trasversali, quindi la nave procede dritta trasversalmente.

2) Fase di manovra: sono presenti

- a) La portanza del timone applicata nel punto C;
- b) La reazione di inerzia della nave F_{iT} applicata in C;
- c) La reazione di inerzia della acqua trascinata F'_{iT} in E.

Il punto E rappresenta il centro di deriva e può essere definito come il baricentro della figura che si ottiene proiettando la superficie di carena sul piano diametrale.

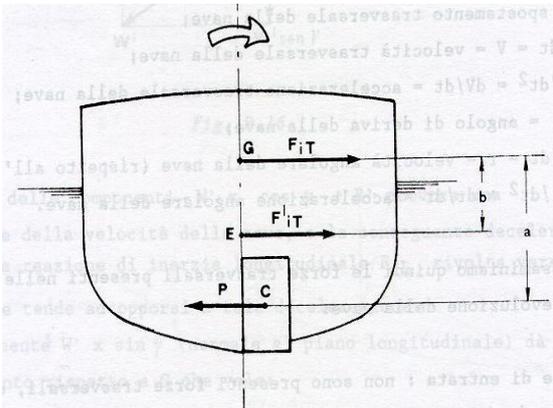
Per D'Alembert la risultante di queste forze è nulla, ma non è tale quella dei momenti intorno all'asse orizzontale di rotazione della nave; applicando il teorema dei momenti rispetto all'asse

longitudinale passante per G otteniamo:

$$M_1 = F'_{iT} \times b \text{ (senso antiorario)}$$

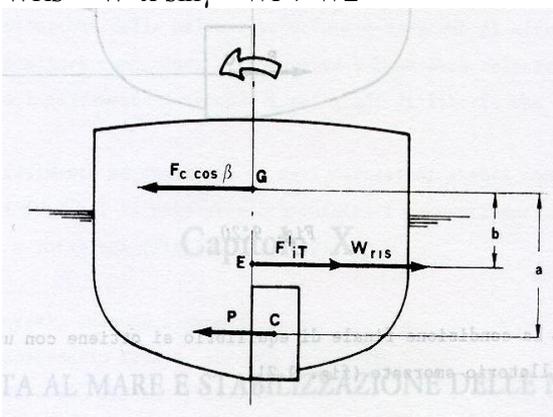
$$M_2 = p \times a \text{ (senso orario)}$$

Essendo $M_2 > M_1$ la nave sbanda verso l'interno della curva di evoluzione (sbandamento di saluto) il momento risultante dovrà essere equilibrato dalla coppia di stabilità della nave.



3) Fase di evoluzione: alle forze già viste si aggiungono :

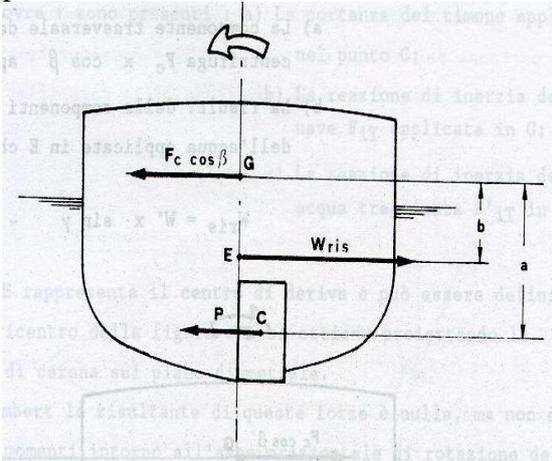
- a) La componente trasversale della forza centrifuga $F_c \times \cos \beta$ applicata in G;
- b) La risultante delle componenti idrodinamiche dell'acqua applicate in E che vale $W_{ris} = W' \times \sin \gamma - W_1 + W_2$



In particolare la forza centrifuga e le forze idrodinamiche stanno crescendo, mentre le reazioni di inerzia stanno diminuendo; in questo caso il momento M_1 è aumentato della

quantità W_{ris} e quindi la nave tenderà a sbandare verso l'esterno della curva di evoluzione.

4) Fase di girazione : scompaiono le forze di inerzia e le altre forze si stabilizzano al valore di equilibrio dinamico; anche in questo caso il momento risultante è verso l'esterno della curva di evoluzione, ma l'angolo di sbandamento è più piccolo che nel caso precedente.



La condizione finale di equilibrio si ottiene con un movimento oscillatorio smorzato

TENUTA AL MARE E STABILIZZAZIONE DELLE NAVI

1. I moti della nave

Con il termine tenuta al mare o seakeeping si intende il comportamento della nave in mare agitato.

Nave ottima sotto questo aspetto è quella che per dimensioni, forma, distribuzione delle masse e strutture è in grado di affrontare il mare nelle migliori condizioni di sicurezza e benessere relativamente ai possibili moti fondamentali secondo i sei gradi di libertà che la nave possiede.

Con riferimento ad una terna di assi cartesiani aventi come origine il centro di gravità, la nave presenta infatti i seguenti moti di traslazione e rotazione (figg. 1 e 2):

- Avanzo (surge), secondo l'asse Y;
- Deriva o scarroccio (sway), secondo l'asse X;
- Sussulto (heave), secondo l'asse Z;
- Beccheggio (pitch), intorno all'asse X;
- Rollio (roll), intorno all'asse Y;
- Imbardata (yaw), intorno all'asse Z.

Il mare in tempesta assume configurazioni estremamente complesse, non raffigurabili analiticamente; solo uno stato particolare del mare è suscettibile di una simile rappresentazione, il cosiddetto mare morto, cioè quel mare costituito dalle onde regolari che si formano dopo una tempesta, una volta cessato il vento, in assenza di correnti, in lontananza delle coste e su fondali molto profondi.

Queste onde possono essere idealmente ed in prima approssimazione di forma trocoidale, secondo la teoria di Gerstner, ovvero sinusoidale, secondo la teoria di Airy.

Riferendoci ad un'onda di tipo trocoidale diamo alcune definizioni di carattere generale sulle onde (fig. 3):

- Cresta, il massimo del profilo ondoso;
- Cavo, il minimo del profilo ondoso;
- Lunghezza dell'onda (L), distanza tra due creste (o due cavi) consecutive;
- Altezza dell'onda (H), distanza verticale tra cresta e cavo;
- Ampiezza dell'onda (h), semialtezza dell'onda;
- Pendio dell'onda (θ), angolo compreso tra l'orizzontale e la tangente al profilo dell'onda in un punto;

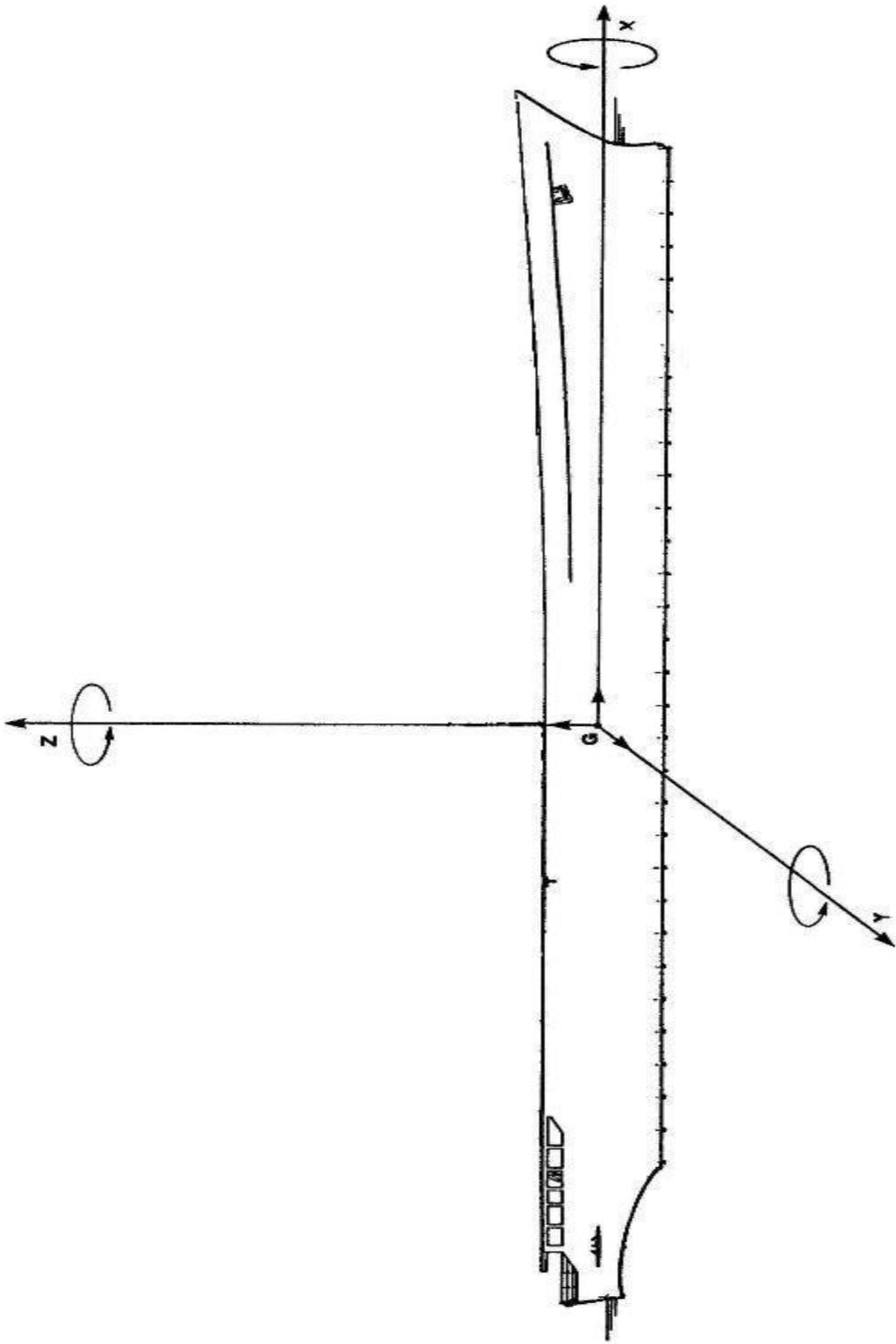
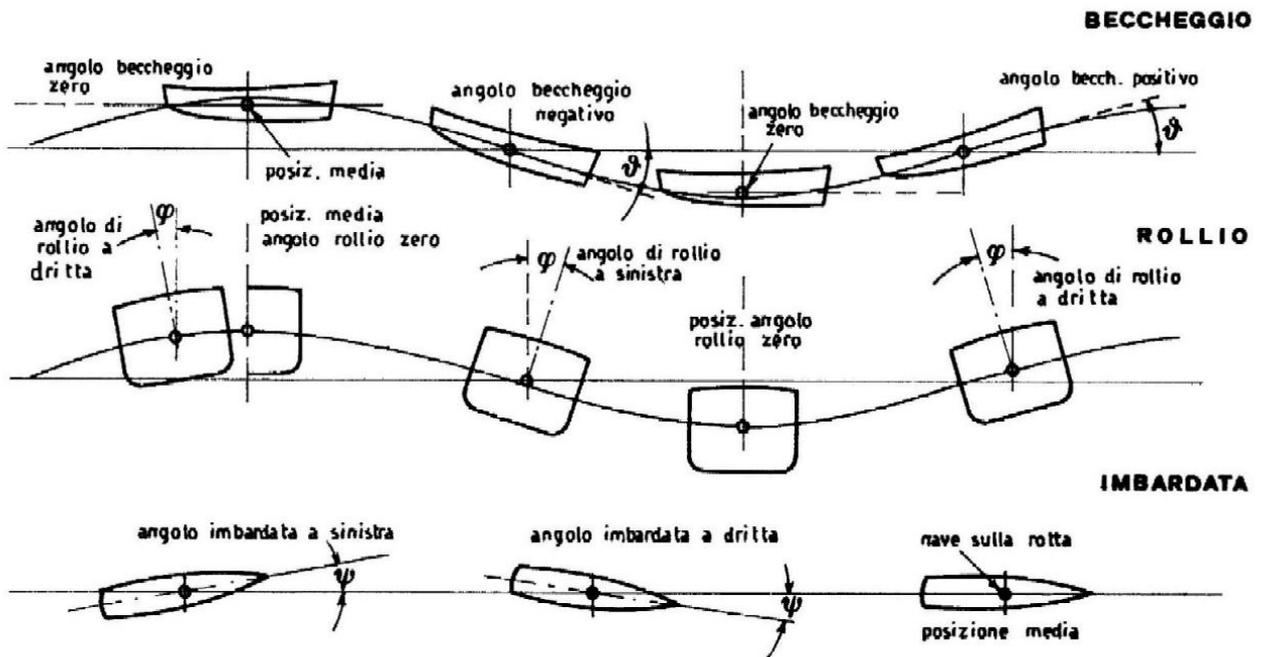
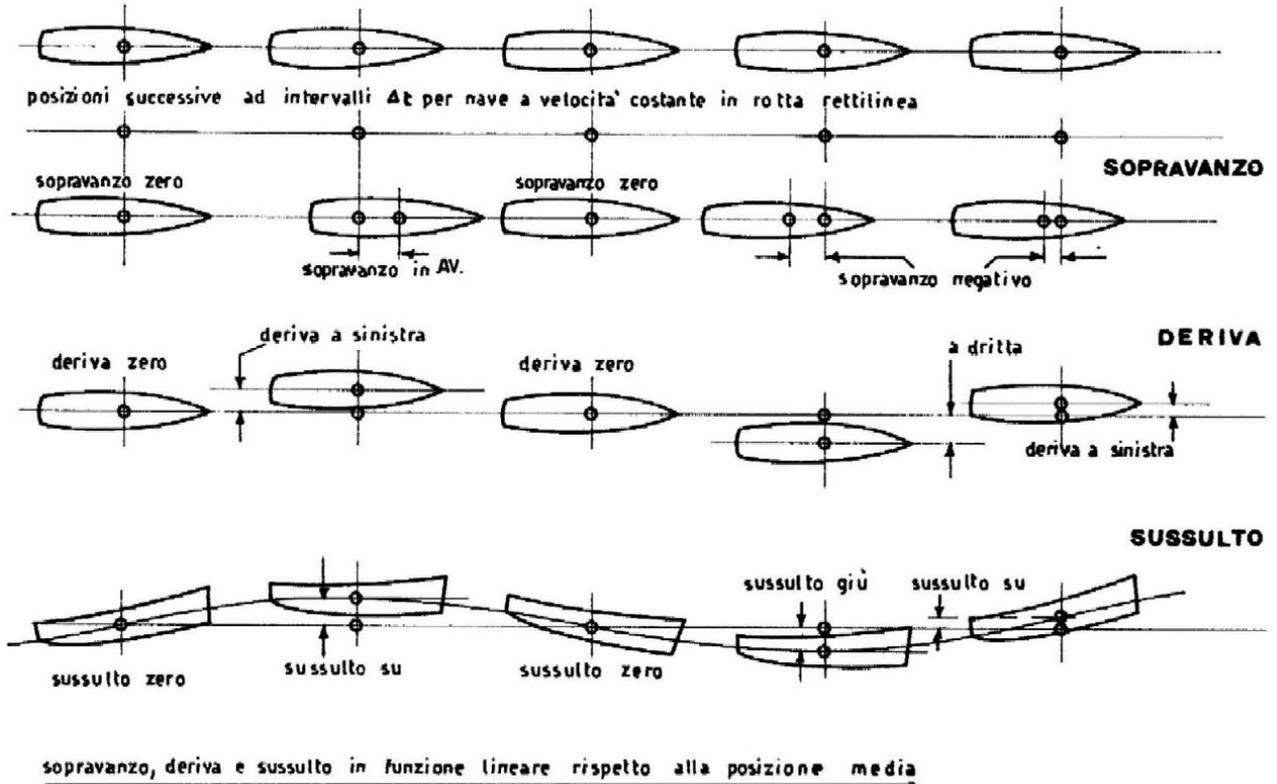


Fig. 7

DEFINIZIONI RELATIVE ALLA TENUTA AL MARE



COSTRUZIONE NAVALE

2.1 Materiali da costruzione

Le caratteristiche dei materiali da costruzioni navali devono rispondere alle seguenti esigenze:

- **Peso specifico:** il più basso possibile compatibilmente con le caratteristiche di resistenza meccanica, allo scopo di ottenere un basso peso scafo;
- **Capacità di conservazione del materiale nel tempo:** cioè resistenza all'attacco degli agenti marini corrosivi;
- **Economicità di lavorazione:** ai fini del costo di costruzione e del tempo di produzione.

A tale scopo è necessario individuare i vari materiali mediante le caratteristiche atte a qualificarlo, valutando di conseguenza il campo di impiego, nonché le limitazioni qualitative ed operative. Suddividiamo i materiali impiegati in:

- **Metallici:** acciaio, leghe leggere, rame, zinco e loro leghe, titanio;
- **Non Metallici:** legno, gomma, ecc.;
- **Compositi.**

2.2 Materiali metallici

Sono i materiali più ampiamente utilizzati in campo navale. Per caratterizzarli vengono effettuate delle prove che forniscono indicazioni utilizzabili ai fini:

- progettuali;
- della lavorazione;
- dell'impiego durevole.

2.2.1 Prove progettuali

Al primo gruppo appartengono quelle prove effettuate su provini per mezzo di idonee apparecchiature, ed in particolare:

Prova di TRAZIONE: viene effettuata mediante macchina idraulica fissando il provino con dei morsetti. Dalla prova si ottiene un diagramma di trazione: forza agente - allungamenti (figura 2.1).

Questo diagramma può essere suddiviso in quattro zone:

- OA = zona **elastica** (al cessare della sollecitazione il provino ritorna alle dimensioni iniziali), considerevole per gli acciai e molto minore in metalli come Alluminio e Rame;
- AB = zona di **snervamento generale** e permanente con notevole aumento della lunghezza del provino senza rilevante aumento del carico;

- BC = zona di **incrudimento** in cui all'allungamento del campione corrisponde un aumento del carico in misura molto minore della parte elastica;
- CD = zona di **snervamento locale** con rottura del campione nel punto D.

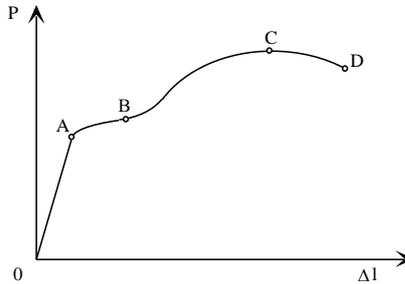


Figura 0.1

Sostituendo al carico di trazione P e all'allungamento del provino rispettivamente la **tensione** σ e la **deformazione** ε , definiti tramite i rapporti:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

dove

A = area della sezione trasversale del provino;

l = lunghezza del provino;

si ottengono indicazioni sulle caratteristiche del materiale e non del provino in quanto i valori si riferiscono all'unità di superficie e all'unità di lunghezza.

L'andamento del diagramma è del tutto simile al precedente (fig. 4.2).

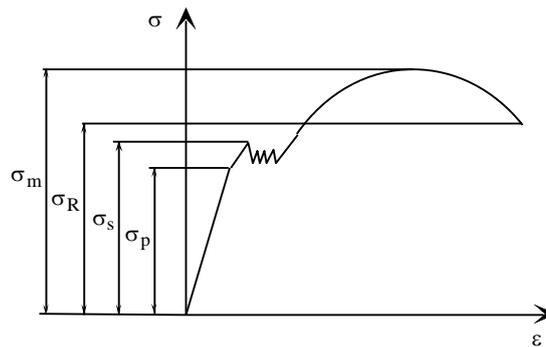


Figura 0.2

Più in particolare si definiscono:

- σ_R = tensione di rottura;
- σ_S = tensione di snervamento;
- σ_p = limite di elasticità.

Generalmente nel campo elastico la deformazione è proporzionale alla sollecitazione; nel diagramma tensione - deformazione (fig. 2.3) tale relazione è indicata da una retta la cui pendenza rappresenta il **modulo di elasticità normale** (o **modulo di Young**):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

La legge di proporzionalità tra sollecitazione σ e deformazione ε nel campo elastico è detta **legge di Hooke**.

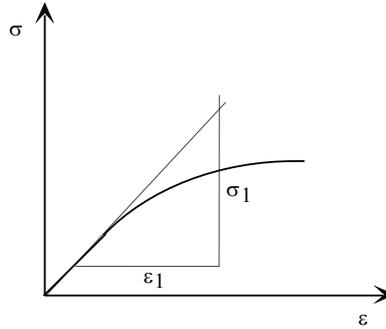


Figura 0.3

Prova di RESILIENZA: serve ad indagare la capacità di un materiale di assorbire un lavoro prima di giungere a rottura in presenza di un intaglio e quindi di concentrazione di tensioni; il provino, di sezione quadrata e dimensioni standard, presenta un intaglio a U o a V e viene colpito con un pendolo dalla parte opposta dell'intaglio (figura 2.4). L'energia potenziale del pendolo che porta alla rottura del provino è la resilienza (Nm), indice della attitudine del materiale a funzionare da **crack-arrester** (impedita propagazione di cricche, lesioni e fessurazioni); le prove vengono effettuate a temperature diverse, e si osserva che diminuendo la temperatura, la resilienza diminuisce, per poi crollare ad una temperatura, detta **temperatura limite di resilienza**.

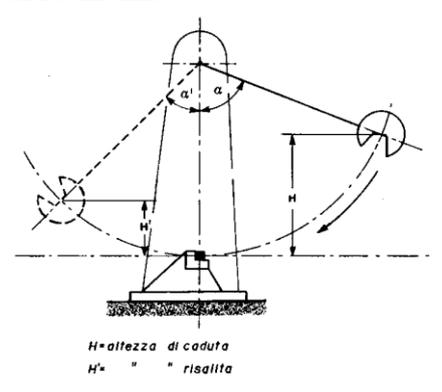


Figura 0.4

Prova di FATICA: quando una struttura viene sottoposta a sforzi di tipo ciclico (vedi nave sottoposta al moto ondoso), può giungere a collasso dopo un certo tempo anche se la sollecitazione massima di esercizio risulta essere inferiore al limite di elasticità del materiale. È questo il fenomeno detto di fatica e le prove servono a determinare il limite sotto il quale il materiale sottoposto a sforzi ciclici resiste indefinitamente.

2.2.2 Lavorabilità

La lavorabilità del materiale è definita dalle seguenti prove e caratteristiche tecnologiche:

- **Piegabilità a freddo:** analizza la duttilità del materiale; un provino rettangolare viene piegato prima a 90°, poi a 180°, fino a far combaciare i lati opposti: sulla superficie tesa non devono apparire lesioni o cricche.
- **Lavorabilità meccanica o di taglio alla fiamma:** certe lavorazioni meccaniche a freddo, in particolare il taglio con la fiamma, la foratura con punzone, la piegatura al maglio, sottopongono il materiale ad intensi sforzi, con alterazione della sua struttura interna che vanno sotto il nome di **incrudimento**, e che sono causa di eccessiva fragilità.
- **Saldabilità:** caratteristica essenziale per eseguire i collegamenti tra le parti strutturali mediante saldatura.

2.3 Impiego durevole nel tempo

2.3.1 La corrosione

Si definisce corrosione in senso generico quell'insieme di fenomeni di natura fisica, chimica ed elettrochimica che hanno come conseguenza la parziale modifica ed asportazione del materiale costituente un manufatto metallico. Tale azione oltre a provocare dei danni economici, crea problemi di sicurezza di estrema gravità; la corrosione non determina soltanto un deterioramento superficiale visibile e controllabile, ma penetra e si insinua tra grano e grano della struttura metallica fino alla disgregazione dell'edificio cristallino. Tale fenomeno è di difficile identificazione e come conseguenza si può avere un'incontrollabile perdita di resistenza della struttura sia alle sollecitazioni statiche e sia a quelle dinamiche.

La corrosione penetra nell'interno delle opere infiltrandosi tra le chiodature, tra le giunzioni, oppure la via di accesso è semplicemente un angolo brusco che la superficie presenta o una discontinuità non opportunamente raccordata; talvolta in assenza dei punti di innesco precedentemente elencati le vie sono microscopiche eterogeneità della struttura granulare e cristallina causate da precedenti lavorazioni tecnologiche, dalla presenza di tensioni interne o dalle stesse sollecitazioni meccaniche cui la struttura metallica è sottoposta.

È possibile fare una suddivisione del processo degenerativo in oggetto in base al mezzo responsabile, per cui distinguiamo fenomeni di:

- **Abrasiono:** dovuta a particelle dure spinte contro la superficie del metallo da liquidi, gas o aria.
- **Erosione:** dovuta all'effetto abrasivo di liquidi o gas defluenti ad alta velocità.
- **Ossidazione:** dovuto all'azione chimica superficiale dell'ossigeno sui materiali con formazioni (tipica è la "ruggine" per i materiali metallici)
- **Corrosione secca:** dovuta al contatto tra metalli e altri composti metallici o metalli
- **Corrosione umida:** dovuta alla presenza di eterogeneità tra metalli uniti da soluzioni

liquide (elettrolita) con creazione di effetti di natura elettrochimica.

2.3.2 Mezzi per ridurre gli effetti corrosivi

I metodi per circoscrivere e ridurre gli effetti corrosivi sono di tipo progettuale e con mezzi protettivi.

Mezzi progettuali

- Scelte dei materiali da costruzione

La scelta dei materiali deve essere orientata verso la maggiore omogeneizzazione, cercando di limitare al massimo l'uso di materiali con grande differenza di potenziale elettrochimico.

Tale orientamento è notevolmente contrastante con la necessità di uso di materiali di particolari qualità tecnologiche intrinseche per certe realizzazioni quali eliche, linee d'assi, cuscinetti, basamenti, riduttori, pompe, valvole, tubolature e strutture in genere.

- Disegno e realizzazioni di strutture e collegamenti

La realizzazione di corrette forme delle strutture è fondamentale per evitare l'innescò di fenomeni corrosivi: si dovrà evitare di costruire strutture con sbalzi repentini, dovranno essere evitati intagli e zone con spigoli vivi, dovranno essere evitati il sovrapporsi di cordoni di saldatura (uso degli scarichi di saldatura), le saldature dovranno seguire tempi e modi in maniera da evitare ogni possibile addensamento di tensioni. Si dovrà, dopo particolari azioni meccaniche, "calmare" il materiale con trattamenti di distensione, usando tutte le conoscenze che la scienza delle tecnologie dei metalli ci propone. Per approfondimenti si lascia lo studente a testi specialistici.

Mezzi protettivi

- Preparazione dei materiali da costruzione

Molti metalli hanno, in misura più o meno sensibile, la vantaggiosa proprietà di autoprotettersi superficialmente, con la formazione di strati di ossidi superficiali impermeabili tali da precludere ulteriori effetti corrosivi.

Tale effetto non è però affidabile in quanto l'ossido naturale superficiale non è sufficientemente compatto e resistente meccanicamente.

Per quanto sopra è consuetudine sostituire artificialmente questo ossido protettivo con un altro film superficiale con caratteristiche di affidabilità e resistenza più consistenti.

La prima operazione per la preparazione di superfici di acciaio è la pulitura delle superfici stesse.

Essa avviene con uso di mezzi meccanici tipo sabbiatura con graniglia metallica a recupero seguito da un abbondante lavaggio con getti d'acqua in pressione per

togliere dalla superficie residui di ossidi.

Azione successiva di preparazione è il decapaggio chimico che consiste nell'immergere per un certo periodo il materiale in soluzioni aggressive diluite.

Per il materiale ferroso si usano soluzioni calde di acido solforico al 10-15% e soluzioni con acido nitrico all'1-5%.

Il decapaggio viene completato con lo sgrassaggio e abbondante lavaggio in acqua.

Il materiale è pronto per l'azione successiva che è la fosfatizzazione. Alla base del processo abbiamo il fosforo ed i suoi sali che applicati opportunamente alla superficie del pezzo creano una patina resistente meccanicamente ed anche ad alta resistenza elettrica.

Il pezzo così trattato è pronto o per la conservazione, ed in questo caso le superfici verranno oleate e quindi stoccate, o per i successivi trattamenti superficiali come la verniciatura. Per gli scafi sono state studiate vernici sintetiche particolarmente resistenti all'ambiente salino quali le vernici bicomponenti a base di resine bituminose autoleviganti e antivegetative con base ramata per l'opera viva, resine bituminose fotoresistenti per i bagnasciuga (zona particolarmente interessata da processi corrosivi), resine al clorocaucciù per i ponti esterni, resine epossidiche per casse e depositi.

- Protezione attiva delle navi

Le correnti galvaniche (effetto pila) sono le cause primarie dei processi elettrochimici di corrosione. Tipico è l'esempio di materiali messi in contatto da una soluzione liquida (acqua di mare) come le diverse parti di uno scafo in cui la concomitante presenza di un circuito elettrico chiuso e di due materiali con diverso potenziale elettrico crea nel circuito una differenza di potenziale e quindi un passaggio di corrente elettrica nel circuito. La parte di metallo dove esce la corrente si chiama anodo e la parte dove entra catodo.

In particolare la zona anodica è quella che si corrode in quanto la fuoriuscita di corrente è accompagnata dalla messa in soluzione di materiale. Il sistema di protezione attivo o protezione catodica si basa sul concetto di imporre che lo scafo da proteggere funzioni da catodo. Questa imposizione viene realizzata applicando dei pani di zinco all'esterno dello scafo a diretto contatto con esso.

In questo modo i pani di zinco, essendo più elettronegativi dell'acciaio funzioneranno da anodo e saranno proprio i pani di zinco a subire processi corrosivi preservando le lamiere dello scafo. In particolare saranno posizionati nei punti di maggiore attività elettrochimica come la volta di poppa, gli astucci porta asse, le prese a mare, le zone A.M.

La protezione catodica è realizzata anche internamente alla nave per proteggere tubolature e strutture varie quali condensatori e scambiatori di calore mediante l'inserimento in opportuni pozzetti di anodi sacrificali sotto forma di cilindretti sagomati; possono essere di materiale diverso dallo zinco quale il ferro dolce e comunque più elettronegativo della struttura da proteggere.

A titolo indicativo si trascrive nella tabella seguente la serie galvanica in acqua di mare di metalli e loro leghe particolarmente interessante per le costruzioni navali :

- | | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| 1) Magnesio (il più anodico) | 16) Ottone navale |
| 2) Leghe di magnesio | 17) Nickel |
| 3) Zinco | 18) Bronzo al silicio |
| 4) Acciaio zincato | 19) Ottone ammiragliato |
| 5) Leghe di alluminio | 20) Rame |
| 6) Cadmio | 21) Cupro-Nickel |
| 7) Duralluminio | 22) Nickel passivato |
| 8) Acciaio | 23) Monel |
| 9) Ghisa | 24) Inossidabile 18/8 (304) passivato |
| 10) Acciaio inossidabile | 25) Inossidabile 18/8 (316) passivato |
| 11) Acciaio inossidabile 304 | 26) Argento |
| 12) Acciaio inossidabile 316 | 27) Oro |
| 13) Piombo | 28) Platino (il più catodico) |
| 14) Stagno | |
| 15) Bronzo al manganese | |

2.4 Materiali metallici più utilizzati

2.4.1 L'acciaio

L'acciaio, materiale costituito da ferro con l'apporto di una percentuale di carbonio, è divenuto col tempo il principale materiale da costruzione navale ed ha subito nel tempo una graduale evoluzione che ne ha migliorato le caratteristiche tecnologiche e meccaniche.

L'uso dell'acciaio presenta i seguenti vantaggi e svantaggi:

- Riduzione del peso strutturale di circa il 40% rispetto ad una analoga costruzione in legno;
- Aumento della capacità interna destinabile al carico a seguito delle semplificazioni strutturali e le ridotte dimensioni delle ossature (anche il 15÷20% a parità di dislocamento);
- Una maggiore sicurezza per quanto riguarda il pericolo di incendio e una maggiore impermeabilità dei fasciami;
- Facilità di costruzione e riparazione;
- Maggiore durata;
- Peggiori condizioni di vivibilità derivante dalla conduttività termica dei metalli e dalla condensazione del vapor d'acqua sulle parti in acciaio;
- Minore resistenza agli urti;
- Presenza di corrosione, la cui azione si riesce solamente a rallentare, ma non ad eliminare.

In base alla **composizione chimica**, che ne condiziona l'impiego sia in relazione all'importanza dell'elemento strutturale, sia in relazione al tipo di collegamento, gli acciai vengono designati dal R.I.Na. con le sigle A, S, D, SS, E; in relazione alle **caratteristiche meccaniche** gli acciai da scafo si suddividono in:

- acciai **ordinari**: con carico di snervamento minimo compreso tra 235 e 265 N/mm² e carico di rottura compreso tra 400 e 530 N/mm²;
- acciai ad **elevata resistenza (ER)**: con carico di snervamento minimo compreso tra 285 e 380 N/mm² e carico di rottura tra 430 e 645 N/mm²; sono particolarmente usati nelle grandi costruzioni e nelle navi militari, nelle zone maggiormente sollecitate, perché a parità di resistenza hanno un peso sensibilmente minore, ovvero a parità di peso consentono la realizzazione di strutture più resistenti; inoltre grazie alla elevata resilienza, funzionano da crack-arrester; unici inconvenienti, il costo più elevato (che per grandi navi può essere comunque compensato dal guadagno effettivo di peso).

Le principali caratteristiche meccaniche degli acciai ordinari da scafo e di quelli ad elevata resistenza ER sono riassunte e comparate in tabella.

Designazione tipo di Acciaio	ACCIAI ORDINARI		ACCIAI ER			
	A-S-D- SS-E	S27- SS27-E27	ER29	ER32	ER36	ER39
Snervamento σ_s N/mm ² (kg/mm ²)	235 (24)	265 (27)	285 (29)	315(32)	355(36)	380(39)
Rottura σ_R N/mm ² (kg/mm ²)	400÷490 (41÷50)	400÷530 (41÷54)	430÷540 (44÷55)	470÷590 (48÷60)	490÷620 (50÷63)	510÷645 (52÷66)
Allungamento (%)	22	22	22	22	21	20
Resilienza Joule (kgm)	27 (2.8)	27 (2.8)	27 (2.8)	31 (3.2)	31 (3.2)	39 (4.0)

L'acciaio speciale HY 80 (High Yield 80000 lb/sq in)

Nella costruzione dei sommergibili sono stati impiegati acciai speciali dotati di resistenza meccanica sempre più elevata, specie per quanto riguarda il limite di snervamento e la tenacità. Tali caratteristiche tecnologiche sono ottenute mediante l'aggiunta di elementi di lega e trattamenti termici, che creano per contro particolari problemi, specie nei riguardi della saldabilità.

Per la costruzione dello scafo resistente dei smg classe "Sauro" è stato impiegato l'HY 80, un acciaio speciale messo a punto negli USA.

Esso presenta le seguenti caratteristiche meccaniche (confrontate con quelle di alcuni acciai ordinari ed un acciaio ER).

Confronto tra le Caratteristiche Meccaniche dell'acciaio HY80 con altri acciai					
Tipo di acciaio		HY80	E	E27	ER39
Caratteristiche Meccaniche	σ_R (N/mm ²)	716	490	530	645
	σ_S (N/mm ²)	567	235	265	380
	A (%)	24	22	22	20
	Hv (J)	23	27	27	39

Sono possibili applicazioni di acciai con resistenza ancora più elevata, quali l'HY 100 ed HY 140, con valori del limite elastico di circa 1000 N/mm².

Per la costruzione dei nuovi sommergibili (U212) della M.M.I. viene impiegato acciaio inossidabile per le doti di amagnetività del materiale.

2.4.2 Il Titanio e le sue leghe

È un elemento metallico appartenente al IV Gruppo del Sistema Periodico; è contenuto in metalli quali il Rutilio (biossido di Titanio, TiO₂) e l'Ilmenite (ossido di Ferro e Titanio). Viene impiegato, con l'aggiunta di elementi quali Alluminio, Stagno, Molibdeno, Vanadio, Nichel e Ferro, sotto forma di leghe, che presentano caratteristiche meccaniche comparabili a quelle di un ottimo acciaio legato, con il vantaggio di un peso specifico che è poco più della metà ed una temperatura di fusione di 1668°C; la sua eccezionale resistenza alla corrosione ed alla erosione consente di mantenere in quasi tutti gli impieghi lo stato iniziale di finitura superficiale. Il costo di produzione è elevato, inoltre è considerato materiale strategico, terzo per importanza dopo Cromo e Cobalto, in quanto impiegato nelle costruzioni belliche ed aerospaziali.

I settori di impiego del Titanio sono molteplici:

- **Aeronautico:** sia per gli elementi strutturali che per i motori, a causa dell'eccellente rapporto resistenza-peso specifico (2÷2.5 volte superiore a quello dell'acciaio), resistenza meccanica agli sbalzi termici, alla corrosione, alla fatica;
- **Industriale:** impianti chimici relativi alla produzione di sostanze corrosive, scambiatori di calore, parti di macchine termiche come turbine e caldaie;
- **Navale:** sono svariati e dipendono, come già detto, dal favorevole rapporto resistenza-peso specifico, (eliche, assi, parti di motore, ...).

2.4.3 Le leghe leggere

Le leghe leggere hanno come costituente principale l'Alluminio unito ad altri metalli, i quali variamente dosati danno luogo a gruppi di leghe aventi, rispetto all'acciaio, le seguenti caratteristiche:

- **Peso specifico basso**, compreso tra 2700 e 3000 kg/m³, cioè 1/3 circa rispetto all'acciaio (7800 kg/m³);
- **Modulo di elasticità E basso**, pari a 70000 N/mm², contro i 206000 N/mm² dell'acciaio; a parità di sollecitazione una struttura in lega leggera subisce deformazioni triple rispetto ad una identica struttura in acciaio;
- **Carichi di rottura, snervamento e limiti di elasticità**, variabili entro un ampio campo di valori, non solamente a seconda del tipo di lega, ma anche, per una stessa lega, a seconda del grado di incrudimento subito per lavorazioni meccaniche;
- **Resistenza alla corrosione generalmente modesta**, dato che l'Alluminio essendo più elettronegativo degli altri metalli da costruzione a contatto con essi si comporta da anodo, andando incontro a rapida usura; ciò comporta la necessità di isolarlo completamente dal contatto con gli altri metalli a mezzo di guarnizioni o vernici;
- **Facile lavorabilità a freddo**;
- **Sensibilità all'affaticamento maggiore**: si traduce nel fenomeno della cosiddetta corrosione da sforzo, causa di fessurazioni, dovuta a fenomeni di fatica (sollecitazioni ripetute nel tempo) ed alla presenza di tensioni residue di saldatura;
- **Bassa temperatura di fusione**, circa 700°C, che rappresenta un grosso pericolo in caso di incendio; è questo fatto che ne limita pesantemente, allo stato attuale, l'applicazione in campo navale militare;
- **Difficile saldabilità**, dovuta alla elevata affinità dell'Alluminio con l'Ossigeno, particolarmente alle alte temperature, ove si ha formazione di Allumina, che tra l'altro ha punto di fusione molto superiore a quello della lega leggera; la saldatura viene effettuata in ambiente inerte (Argon, Elio), per impedire la formazione di questo strato di ossido;
- **Costo del materiale molto elevato**, pari a circa 6 volte quello dell'acciaio; tenendo conto della economia di peso che ne deriva, il costo finale del prodotto risulta essere tre volte superiore; inoltre il processo di saldatura in atmosfera inerte richiede attrezzature costose e personale specializzato.

L'impiego delle leghe leggere in campo navale è limitato alla costruzione di piccoli scafi leggeri e veloci, e delle sovrastrutture di grandi navi mercantili, per limitare l'entità dei pesi posti in alto, ottenendo così un abbassamento della quota del baricentro a vantaggio della stabilità di peso della nave. In campo militare dopo l'esperienza delle Falkland, l'impiego delle leghe leggere è stato drasticamente ridotto.

2.4.4 Rame, zinco e loro leghe

Altri materiali impiegati in campo navale sono i seguenti:

- **Rame**: utilizzato per tubolature, condutture elettriche, guarnizioni, e come

componente per le sue leghe, quale il **cupronichel** (70% Cu, 30% Ni), impiegato per la costruzione di tubolature per la circolazione di acqua mare;

- **Bronzo**: è una **lega di rame e stagno**, usata per parti di macchinari e valvolame; con l'aggiunta di particolari elementi si ottengono i cosiddetti **bronzi speciali**; l'aggiunta di Alluminio, per esempio, garantisce alla lega una forte resistenza alla corrosione in acqua salata e facilità di fusione, e la rende particolarmente adatta per la costruzione delle eliche navali;
- **Ottone**: è una **lega di rame e zinco** utilizzata per parti di allestimento (tubi, passamano, ecc.);
- **Zinco**: usato puro sotto forma di pani per la protezione contro le correnti galvaniche.

2.4.5 Materiali per la fabbricazione delle eliche

Le leghe impiegate per la costruzione delle eliche devono soddisfare i seguenti requisiti:

- possedere elevata colabilità e fluidità, necessarie per le operazioni di fonderia;
- possedere caratteristiche idonee alla lavorazione per asportazione di truciolo, necessarie per finire il prodotto entro lo stretto campo di tolleranza richiesto;
- presentare elevate caratteristiche di resistenza ai carichi dinamici a fatica, in ambiente corrosivo quale è l'acqua di mare;
- presentare eccellente durezza superficiale per la resistenza alla erosione;
- possedere caratteristiche che le rendono idonee ad essere riparate o raddrizzate mediante saldatura o deformazione plastica a caldo.

La lega più antica impiegata per la costruzione di eliche è l'ottone ad elevata resistenza a trazione contenente il 60% di rame ed il 40% di zinco.

Il bronzo invece è una lega rame-stagno (fino al 25÷30%) che presenta una notevole resistenza alla corrosione, alla fatica, alla trazione, all'usura, nonché durezza, saldabilità ed attitudine ad essere lavorata all'utensile.

Tutti i bronzi presentano grande attitudine alla fusione (800÷1000°C) bassissimo ritiro e scarsa tendenza alle fessurazioni.

La richiesta di leghe per eliche con qualità meccaniche più spinte, ha portato allo sviluppo dei bronzi all'alluminio ed in particolare il bronzo al nickel-alluminio ed al manganese-alluminio.

2.5 I materiali non metallici

2.5.1 Il legno

Sino alla fine del XVIII secolo il legno fu l'unico materiale usato nelle costruzioni navali, poiché nessun altro materiale era così prontamente disponibile e facilmente lavorabile con le attrezzature del tempo.

Il legno però a causa delle scarse caratteristiche di resistenza e delle difficoltà nella realizzazione dei collegamenti tra i vari elementi costruttivi della nave non permetteva la realizzazione di scafi molto grandi.

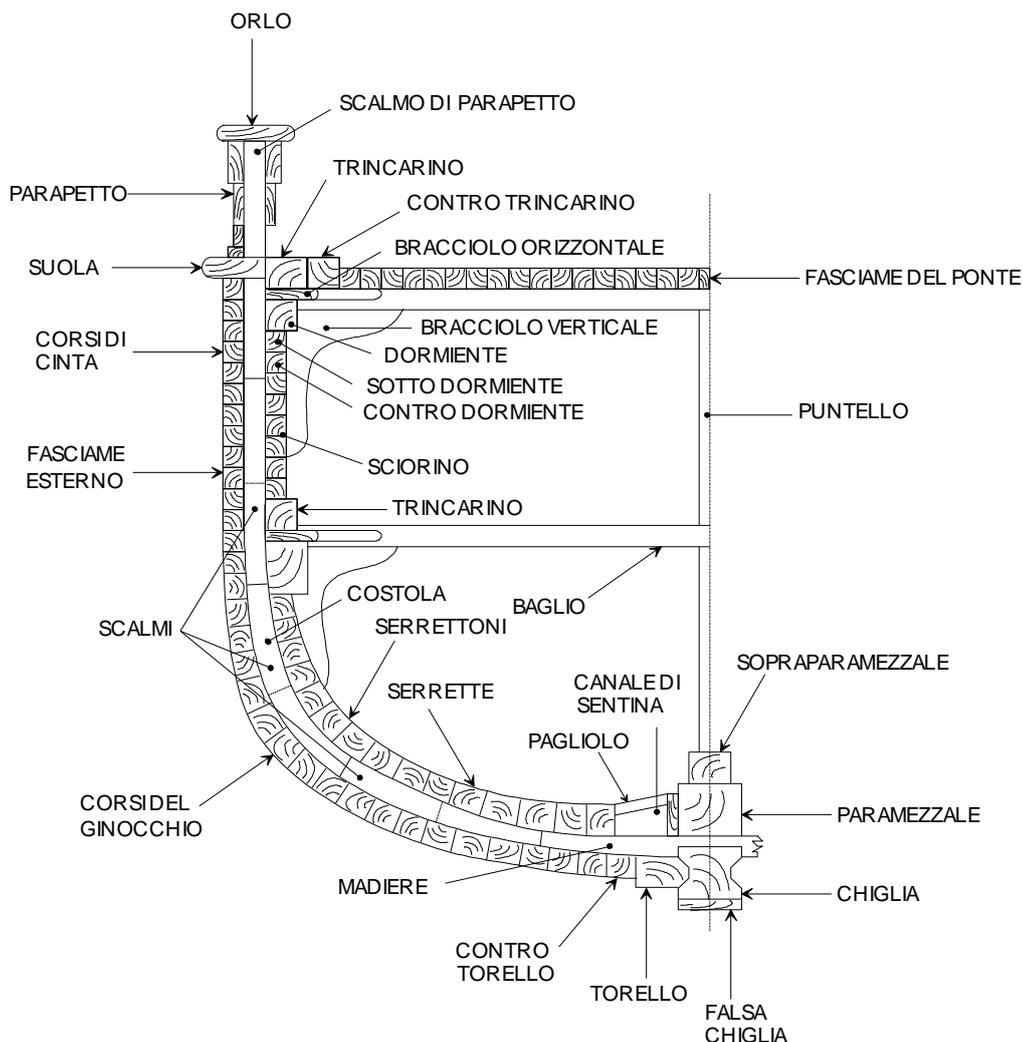
Verso il 1830, con l'avvento della propulsione a vapore, si cominciarono a costruire le prime navi in ferro, e verso il 1870 fu introdotto gradualmente l'uso dell'acciaio. L'uso del legno fu quindi progressivamente abbandonato, tranne che per la costruzione di piccole imbarcazioni da diporto e dei dragamine (prima dell'avvento della vetroresina), ma soprattutto per l'allestimento.

Il legname per la costruzione navale deve resistere all'ambiente marino ed all'attacco dei parassiti, dovrebbe essere ottenuto in grossi pezzi a fibra dritta, privo di nodi e naturalmente possedere buone caratteristiche di resistenza e basso peso specifico.

I principali tipi di legno (e le loro caratteristiche) sono i seguenti:

- **Quercia, olmo, iroko:** legni compatti adatti per le parti fondamentali dello scafo (chiglia, ordinate, dritto di poppa e prua);
- **Acacia, frassino:** legni molto elastici e resistenti usati per elementi che devono essere sagomati con piegatura;
- **Teak:** legno molto grasso, compatto e di lunga durata, adatto per il rivestimento dei ponti;
- **Noce, mogano, pino, larice:** legni elastici di facile lavorazione molto indicati per il fasciame.

Oltre all'impiego del legno come massello viene usato anche il **compensato marino**, prodotto unendo sottili fogli di legno a fibre alternate a 90 gradi con colle sintetiche ad alta resistenza.



2.5.2 I materiali compositi

I materiali compositi, noti fin dall'antichità, sono ottenuti accoppiando due o più materiali per ottenere proprietà complessive superiori o diverse (argilla-paglia, calcestruzzo-tondino di ferro, ecc.).

In generale essi si definiscono come "Sistemi eterogenei costituiti da due o più fasi macroscopiche diverse tra loro o nella forma o nella composizione chimica o in entrambe".

Tra i materiali compositi della prima generazione che interessano maggiormente il settore navale vi sono i **plastici rinforzati con fibre di vetro**, disponibili sul mercato dal 1940, quando negli Stati Uniti è iniziata la produzione su scala industriale.

I costituenti principali dei materiali compositi fibrosi quali il G.R.P. sono la **matrice**, con funzione essenzialmente legante, e le **fibre**, che esplicano la funzione di rinforzo e di sopportazione del carico.

L'unione tra matrice e fibra deve essere tale da resistere alle sollecitazioni presenti nell'interfaccia, che costituisce la zona di transizione tra le due componenti.

Un materiale composito è un materiale **anisotropo**, in quanto presenta proprietà meccaniche diverse a seconda della direzione delle sollecitazioni alle quali viene sottoposto; diviene **isotropo**, come nel caso del multistrato, se ogni lamina viene orientata diversamente.

2.5.3 *Le fibre di vetro*

Il vetro è un materiale di natura inorganica impiegato per primo nella fabbricazione delle fibre artificiali; è un materiale a basso costo che presenta temperature di fusione relativamente basse alle quali, per trafilazione in apposite filiere, si ottengono delle fibre con buone proprietà meccaniche.

Per la fabbricazione delle fibre esistono due tipi di vetro, **vetro E** e **vetro S**.

Il vetro E è il tipo di vetro più impiegato per il suo basso costo, mentre il vetro S, per le sue superiori proprietà meccaniche (modulo di elasticità, carico di rottura, ecc.) viene impiegato quando sono richiesti alti valori di resistenza specifica in costruzioni che devono resistere ad elevate sollecitazioni.

Le principali proprietà delle fibre di vetro, sono le seguenti:

- Elevata resistenza specifica;
- Buona elasticità, con allungamenti massimi, a rottura, dell'ordine del 5%;
- Buone proprietà di riscaldamento: non sono combustibili, hanno un basso coefficiente di dilatazione ed una elevata conducibilità termica, conservano una buona resistenza meccanica anche alle temperature elevate (il 50% a 350°C, il 25% a 500°C);
- Buona stabilità chimica e basso assorbimento di umidità;
- Buona resistenza agli attacchi degli agenti chimici;
- Elevata resistenza elettrica;
- Costo inferiore a quello di tutte le altre fibre.

Le fibre di vetro si trovano in commercio sotto forma di:

- **Roving**: fascio di fili continui di vetro, riuniti assieme con o senza torsione;
- **Mat**: feltro più o meno spesso di filamenti continui o non disposti a caso nelle varie direzioni come i feltri di lana o cotone;
- **Chops**: fibre corte di vetro, generalmente ottenute tagliando il roving, e normalmente depositate a spruzzo insieme alla resina;
- **Stuoia**: tela di vetro tessuta con roving ad alto titolo con trama uguale all'ordito;
- **Tessuti**: di vario genere, ottenuti con roving a basso titolo (e quindi molto più leggeri delle stuoie), con trama e ordito di peso generalmente diverso;
- **Nastri**: fasci di roving di larghezza limitata (alcuni centimetri) tenuti insieme da una trama molto leggera, e quindi con resistenza prevalente secondo la lunghezza.

2.5.3.1 Matrici organiche

Gli **alti polimeri sintetici** sono i materiali più idonei per tenere insieme le fibre dei materiali compositi fibrosi; questi costituenti a funzione legante vengono distinti in **termoindurenti** e **termoplastici**, in relazione al loro diverso comportamento nel processo di produzione.

Le matrici termoindurenti sono materie plastiche sintetiche che per effetto del calore o in presenza di catalizzatori o radiazioni assumono una struttura rigida, tridimensionale, praticamente infusibile e insolubile nei solventi organici.

Il termine "termoindurente" è improprio perché il processo può avvenire anche a temperatura ambiente.

Le matrici termoplastiche sono materie plastiche sintetiche a struttura lineare o ramificata, capaci di rammollirsi o fondere per azione del calore e di sciogliersi nei solventi organici; al raffreddamento o per evaporazione del solvente il materiale indurisce e riprende le caratteristiche di partenza.

2.5.3.2 Il G.R.P.

Nel campo della costruzione navale l'utilizzo delle fibre composite è limitato essenzialmente al G.R.P. (Glassfibre Reinforced Plastic).

Dopo la II Guerra Mondiale se ne iniziò l'impiego, specie per prodotti di piccole dimensioni quali imbarcazioni da diporto e pescherecci; la tendenza dei primi costruttori era quella di riprodurre in G.R.P. strutture tradizionali realizzate in legno, acciaio e lega leggera; il risultato fu una struttura costosa, intrinsecamente debole, con un ridotto periodo di efficienza.

Successivamente è stato impiegato anche nella costruzione navale militare: falsotorri di sommergibili, scafo esterno di sottomarini a grande profondità (DDU e DRSU) della USN e, nel 1973, per la costruzione del cacciamine britannico MILTON da 450 t.

In Italia la comparsa del G.R.P. quale materiale per la costruzione di imbarcazioni militari è iniziata con mezzi minori, ma soprattutto con la costruzione, da parte del Cantiere INTERMARINE S.p.A., dei **Cacciamine Classe "LERICI"**. La scelta di questo materiale per navi contromisure mine (MCM Vs) è dovuto alle migliori caratteristiche antishock rispetto al legno (con il quale fino ad allora erano stati costruiti i dragamine) ed alla assenza di segnatura magnetica.

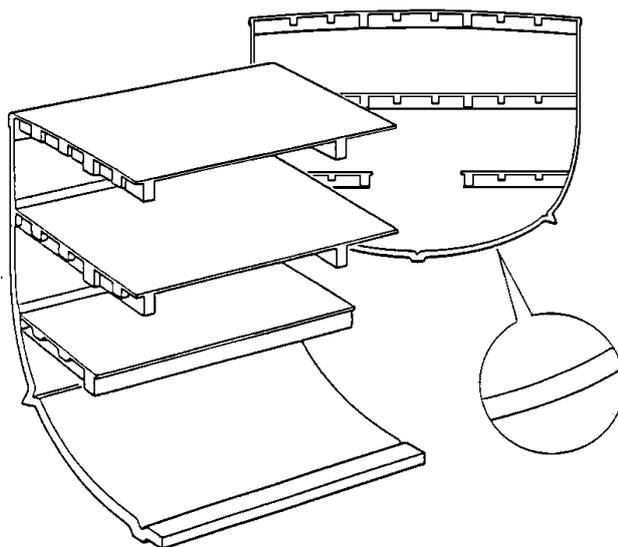
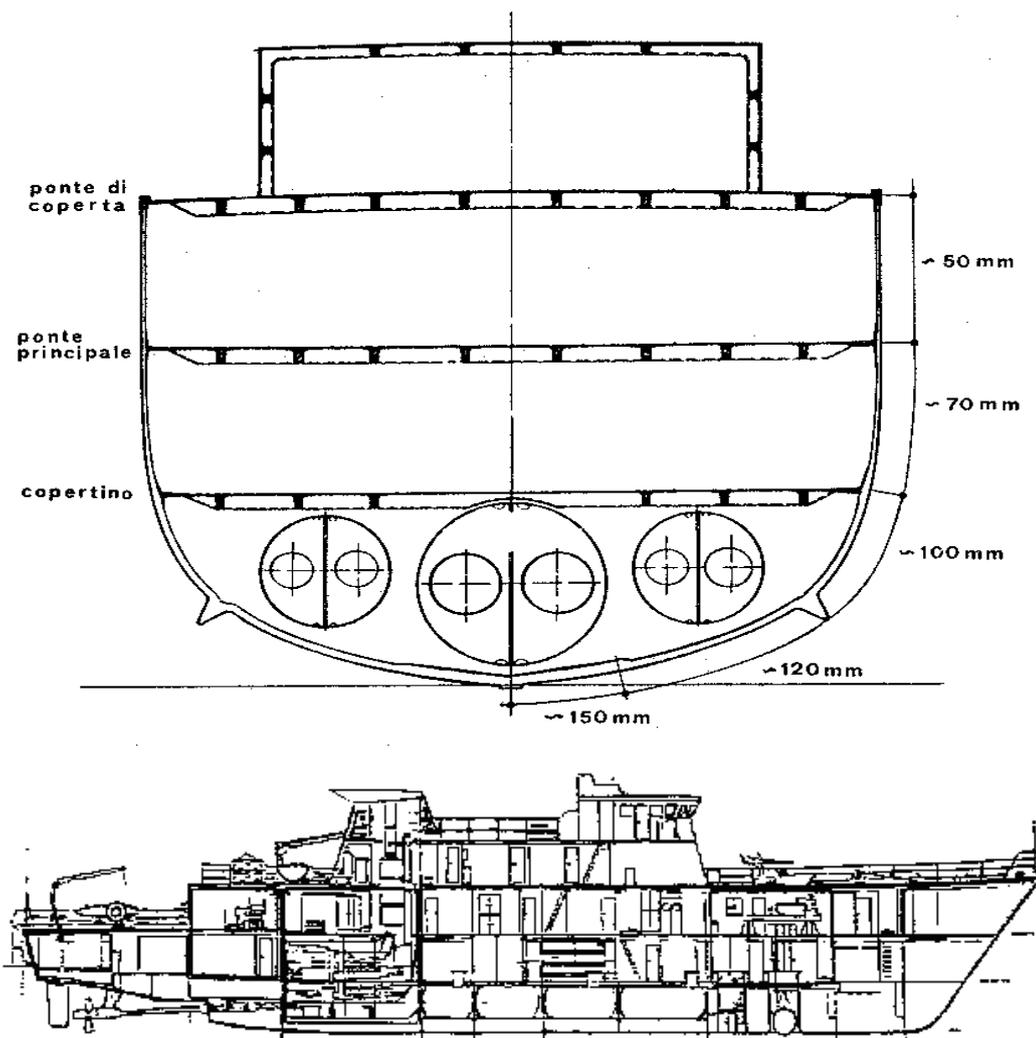


Figura 0.5

Opportunamente usato, il G.R.P. presenta interessanti proprietà rispetto ai materiali tradizionali da costruzione:

- Non si decompone o corrode, richiede bassissima manutenzione ed ha conseguentemente una lunga vita operativa e costi relativamente bassi;
- Non presenta magnetismo permanente o indotto;
- Presenta eccellenti proprietà di isolamento termico/acustico ed alle vibrazioni;
- Possiede una eccezionale resistenza all'impatto ed eccellenti caratteristiche balistiche;
- Con l'adozione di determinate concezioni strutturali si hanno imbarcazioni estremamente semplici da costruire e riparare, difficilmente danneggiabili anche sotto severi carichi dinamici da shock, mentre il peso della struttura resta comparabile con quello di una equivalente nave costruita in acciaio;
- Eccellenti proprietà di resistenza a fatica.

Da notare che, per permettere allo scafo deformazioni elastiche sensibili, la robustezza sul fondo della nave è assicurata solo dal "guscio" in G.R.P. e non sono presenti nervature interne come nelle normali navi in acciaio.



2.6 Collegamenti

2.6.1 Generalità

Quando si costruivano navi in legno si incontravano non poche difficoltà per unire con la necessaria rapidità e garanzia di robustezza i diversi elementi costituenti lo scafo ed ottenere una soddisfacente impermeabilità dei fasciami.

Per dare forma alle ossature e collegarle tra loro si dovevano infatti realizzare numerosi incastri che venivano rinforzati con perni, chiodi e caviglie.

Dopo essere stati fissati alle ossature, i fasciami venivano sottoposti ad una operazione di impermeabilizzazione, detta calafataggio, che consisteva nel chiudere con stoppa e pece liquida tutte le fessure, "comenti", tra le tavole.

Con il passaggio alle costruzioni metalliche si realizzarono notevoli semplificazioni nei procedimenti di unione tra le varie parti; anche se il solo procedimento impiegabile era quello della chiodatura, ottenuta a mezzo di chiodi inseriti e bloccati entro fori appositamente praticati negli elementi da collegare.

A partire dal 1940 venne introdotta, seppure in maniera lenta e graduale, la saldatura, dapprima nei collegamenti meno importanti, quindi in zone sempre più estese, fino alla completa realizzazione dello scafo; si nutrivano infatti dubbi sulla sua resistenza agli sforzi e soprattutto si temevano inaccettabili variazioni delle caratteristiche meccaniche del metallo nelle immediate vicinanze dei lembi saldati.

L'esperienza acquisita negli anni con il progredire delle tecniche di saldatura ed il miglioramento delle qualità meccaniche e tecnologiche degli acciai da scafo hanno messo comunque in luce i vantaggi di questo tipo di collegamento:

- Impiego di manodopera non altamente specializzata;
- Riduzione dei tempi di lavorazione;
- Riduzione del peso scafo, a seguito della eliminazione di sovrapposizioni di lamiera, contropesce ed una grande quantità di angolari di collegamento e di ali di attacco dei profilati alla lamiera.

Dal canto suo, la chiodatura presentava i seguenti vantaggi:

- Riduzione dei tempi di prefabbricazione: la presenza di orli chiodati infatti semplificava il montaggio e soprattutto riduceva le tensioni residue interne dovute al violento apporto termico della saldatura e quindi le deformazioni complessive, fastidiose in sede di collegamento dei vari "blocchi" prefabbricati;
- Azione di "crack-arrester": quando si produceva una lesione nella lamiera infatti, si innescava una cricca che, propagandosi in presenza di chiodatura, si limitava alla sola lamiera di origine (a meno che non incontri il foro nel suo cammino).

Tali caratteristiche hanno determinato la sopravvivenza della chiodatura fino a pochi anni fa.

2.6.2 La chiodatura

La chiodatura è un sistema di collegamento fisso tramite chiodi; l'operazione consiste nel sovrapporre tra loro le due parti da collegare, preventivamente forate, e nel ribadire a caldo o a freddo la porzione sporgente del gambo del chiodo infilato nelle forature allineate in modo da formare una testa analoga a quella esistente.

La contrazione del gambo durante il raffreddamento oppure la ribaditura a freddo determinano una energica azione di compressione tra le superfici da collegare e l'insorgere di una resistenza di attrito che si oppone al mutuo scorrimento; il gambo del chiodo risulta pertanto soggetto a trazione, mentre le lamiere sono compresse.

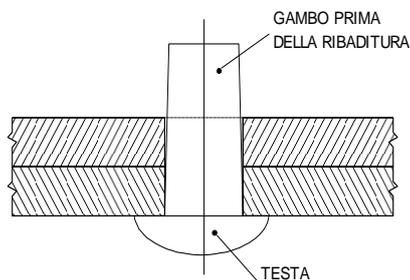


Figura 0.6 a

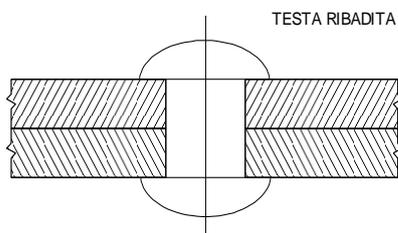


Figura 0.6 b

Dunque il collegamento è assicurato non dalla resistenza a taglio del gambo dei chiodi (peraltro molto modesta nei confronti delle sollecitazioni in gioco), ma dall'attrito che nasce tra lamiera e lamiera per effetto della contrazione del gambo.

Quando in un giunto chiodato si arriva allo scorrimento delle lamiere, la rottura può avvenire perché i gambi dei chiodi cedono al taglio, oppure perché si rompe la lamiera indebolita dalla presenza dei fori.

2.6.2.1

2.6.2.2 Calafataggio

Per realizzare un'unione stagna è necessario procedere all'operazione di calafataggio sia della testa dei chiodi, sia dei lembi delle lamiere, che vanno preventivamente preparati (cianfrinati). Con tale operazione il materiale, a mezzo di appositi attrezzi, viene ricalcato. Se le lamiere sono di piccolo spessore anziché eseguire il calafataggio, si interpone fra le lamiere della tela imbevuta di biacca ed olio di lino cotto, o una qualunque altra sostanza ferma-liquidi.

2.6.3 La saldatura

La saldatura è un procedimento di giunzione che consente di unire permanentemente parti solide, realizzando la continuità del materiale mediante la fusione dei lembi da unire con l'aggiunta di materiale d'apporto.

Le costruzioni saldate, a differenza di quelle realizzate con altri tipi di giunto (come la chiodatura, l'imbullonatura, l'aggraffaggio, ecc.), risultano quindi monolitiche, poiché non vi è interruzione in corrispondenza delle giunzioni.

Ciò rappresenta un vantaggio in quanto viene assicurata la continuità della struttura.

Il processo della saldatura ha soppiantato completamente le altre tecniche di collegamento in quanto le moderne tecnologie permettono di realizzare saldature perfette senza indebolire il materiale nelle vicinanze ed assicurando un alto valore di resilienza tramite l'apporto di particolari componenti nel materiale base e nel materiale di apporto.

2.7 Le strutture navali

2.7.1 Generalità

Per sopportare i carichi cui è soggetta, la nave presenta una struttura formata da pannelli di lamiera saldata, irrigiditi da travi e profilati di vario genere, a costituire un insieme di telai trasversali e longitudinali.

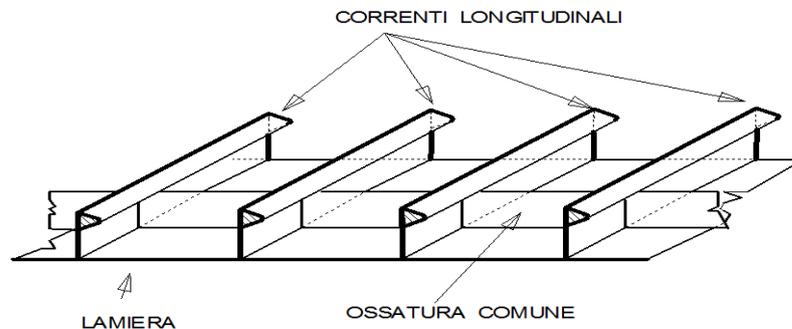


Figura 0.7

Le lamiere ed i rinforzi che formano i telai trasversali, costituiscono una struttura resistente alle sollecitazioni prevalentemente trasversali.

I telai longitudinali, invece, conferiscono allo scafo metallico la necessaria rigidità nei confronti di carichi longitudinali sia in acqua tranquilla che sull'onda.

Per quanto detto è chiaro che la tipologia strutturale di una nave non sarà mai solo di tipo trasversale o longitudinale, ma saranno presenti entrambi i telai. A seconda del tipo di sollecitazioni prevalenti avremo una maggiore o minore presenza di telai trasversali o longitudinali; in particolare si possono riscontrare tre tipologie strutturali:

- struttura "prevalentemente" **trasversale**;
- struttura "prevalentemente" **longitudinale**;
- struttura **mista**.

Oltre a questo, per ogni tipologia strutturale si possono individuare due tipi di elementi di rinforzo:

- **travi principali**: dette anche "rinforzi primari" o "travi rinforzate"; offrono la resistenza alle sollecitazioni principali cui è soggetta la nave e garantiscono la continuità strutturale;
- **travi ordinarie**: dette anche "rinforzi secondari", conferiscono la robustezza locale e fanno da irrigidimento ai pannelli di lamiera del fondo, dei fianchi e dei ponti; questi, inoltre ripartiscono il carico gravante sulle travi principali.

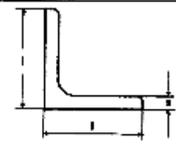
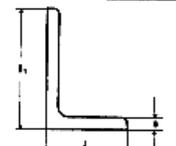
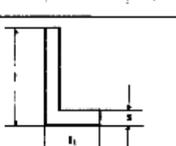
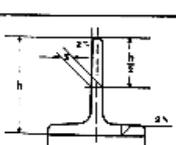
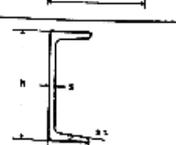
	- Angolari a lati uguali e spigoli tondi. (Correnti, Costole, Bagli per imbarcazioni in ferro o alluminio di piccole dimensioni).
	- Angolari a lati disuguali e spigoli tondi. (Correnti, Costole, Bagli per imbarcazioni in ferro o alluminio di piccole dimensioni).
	- Angolari a lati disuguali e spigoli vivi. (Correnti, Costole, Bagli per imbarcazioni in ferro o alluminio di piccole dimensioni).
	- Profilati a T a spigoli tondi. (Anguille, Costole e Bagli rinforzati per imbarcazioni di piccole dimensioni).
	- Profilati a U. (Puntoni di rinforzo del doppio fondo).
	- Profilati a bulbo dissimmetrico. (Correnti, Costole, Bagli, rinforzi di paratie, sovrastrutture, casse, ecc.).

Tabella 0.8 : Varie tipologie di travi (o profilati)

2.7.2 Struttura prevalentemente trasversale

Tale struttura si adotta su navi di ridotte dimensioni che non presentano elevate sollecitazioni longitudinali, ma principalmente problemi di robustezza trasversale e locale.

La struttura dello scafo è costituita da un insieme di telai trasversali costituiti da:

- **madiere**: lamiera o profilato a T di rinforzo del fondo;
- **costola**: profilato a bulbo o ad L di rinforzo del fianco;
- **baglio**: profilato a bulbo o ad L di sostegno del/dei ponti.

Tali telai sono posti ad opportuna distanza tra loro, detta **intervallo di ossatura**; ogni 3÷5 intervalli di ossatura viene inserita una ossatura rinforzata costituita da travi primarie.

In senso longitudinale vi sono solo travi principali a costituire telai rinforzati per conferire alla nave la necessaria robustezza flessionale. I vari elementi sono opportunamente collegati fra loro mediante squadre o strutture di raccordo.

Le ossature rinforzate sono caratterizzate dagli stessi elementi, ma di dimensioni maggiori (generalmente travi a T) che prendono il nome di:

- madiere rinforzato;
- costola rinforzata;
- baglio rinforzato.

Longitudinalmente si hanno:

- travi di rinforzo del fondo detti **paramezzali**;
- del ponte dette **anguille**.

In funzione della larghezza nave si possono avere più di una di queste travi rinforzate avendo così un paramezzale ed una anguilla centrale e uno o più paramezzali e anguille laterali. Queste travi si raccordano con gli elementi rinforzati verticali delle paratie stagne della nave, montanti rinforzati, a costituire uno o più anelli longitudinali.

2.7.3 Struttura prevalentemente longitudinale

L'esigenza di una struttura prevalentemente longitudinale nasce come conseguenza dell'aumento delle dimensioni ed in particolare della lunghezza della nave.

Le maggiori sollecitazioni di flessione longitudinale necessitano di un maggior numero di elementi strutturali che possano sopportare detti sforzi. La soluzione di adottare una struttura prevalentemente trasversale con un infittimento degli elementi longitudinali primari, presenta lo svantaggio di risultare assai pesante e di fatto inaccettabile. Nasce così una struttura con rinforzi ordinari longitudinali e solo ossature rinforzate, caso tipico delle navi cisterna.

La struttura ha come travi secondarie dei profilati posti longitudinalmente:

- **correnti** del fondo;
- **correnti** del cielo del doppio fondo (se presente);
- **correnti** del fianco;
- **correnti** del ponte.

Sempre in senso longitudinale si hanno un paramezzale ed una anguilla centrale ed uno o più paramezzali e anguille laterali come travi rinforzate. Trasversalmente, ogni 4÷5 intervalli di ossatura sono sistemate le ossature rinforzate costituite da elementi rinforzati.

Oggi la maggior parte delle navi è realizzata con questo tipo di struttura, fermo restando l'adozione della struttura trasversale in quelle zone della nave dove maggiori sono i carichi trasversali e concentrati (gavone di prua, gavone di poppa, locali destinati all'Apparato Motore).

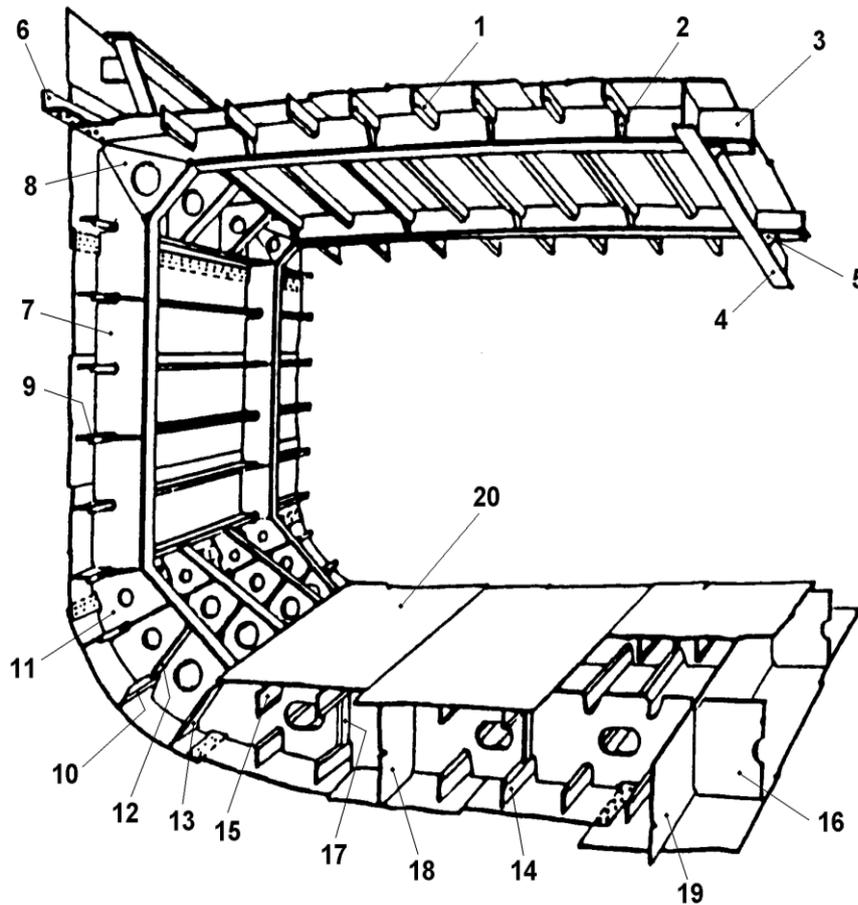


Figura 0.9

Sezione maestra di nave a struttura longitudinale con doppio fondo

- | | |
|--|---|
| 21 - corrente del ponte | 31 - squadra esterna marginale (collega la costola rinforzata con la lamiera del doppio fondo) |
| 22 - squadrette di collegamento del corrente con il baglio rinforzato | 32 - barrotto di irrigidimento della squadra esterna marginale |
| 23 - baglio rinforzato | 33 - lamiera esterna marginale |
| 24 - anguilla | 34 - corrente del fondo |
| 25 - squadretta di collegamento del baglio rinforzato con il ponte | 35 - corrente del cielo del doppio fondo |
| 26 - angolare di trincarino | 36 - madiere piano |
| 27 - costola rinforzata | 37 - barrotto di irrigidimento del madiere e di collegamento dei correnti con il madiere stesso |
| 28 - squadra di collegamento della costola rinforzata con il baglio rinforzato | 38 - paramezzale laterale |
| 29 - corrente di murata | 39 - paramezzale centrale |
| 30 - corrente di ginocchio | 40 - fasciame del cielo del doppio fondo |

2.7.4 Struttura mista

La struttura mista è una struttura intermedia tra le precedenti; essa, infatti, presenta struttura prevalentemente longitudinale sul fondo e sotto il ponte, ma mantiene quella trasversale sui fianchi.

Tale struttura è nata con l'avvento delle grosse navi "bulk carriers" ed offre il vantaggio di avere una buona resistenza alla flessione per la presenza di elementi longitudinali nelle zone maggiormente sollecitate della nave, ma l'adozione di costole sui fianchi in modo da non intralciare lo stivaggio del carico solido alla rinfusa, per il loro limitato ingombro trasversale. Si avranno quindi **correnti longitudinali** come nel caso precedente e **costole ordinarie** ad ogni intervallo di ossatura.

L'ossatura rinforzata è al solito composta da madiere, costola e baglio rinforzato.

2.7.5 La struttura del fondo

Il fondo è uno degli elementi strutturali principali della nave in quanto si trova, come il ponte, alla maggiore distanza dalla mezzeria della sezione considerata e sopporta le massime sollecitazioni.

Tale struttura può essere:

- a **fondo semplice**;
- a **doppio fondo**;

a seconda delle dimensioni della nave e del carico trasportato.

Il fondo semplice si adotta su navi di piccole dimensioni, su gasiere ed in genere su tutte le navi in cui il tipo di carico non richiede stive di particolare forma.

Il doppio fondo, ormai largamente usato, si adotta qualora la movimentazione del carico richieda una stiva con fondo completamente piano; è il caso delle navi portarinfuse, delle portacontenitori, dei traghetti ecc.. Il doppio fondo inoltre consente di poter disporre di ampie casse e cisterne, dette "strutturali", per il contenimento di carichi liquidi (combustibile, acqua, olio, zavorra).

Per le navi militari costituisce, inoltre, un importante elemento di difesa passiva contro le esplosioni subacquee, falle ed incagli.

Il doppio fondo, oltre ai pregi già accennati, costituisce una struttura "scatolare", caratterizzata da una elevata resistenza sia alle sollecitazioni verticali dovute al carico che a quelle longitudinali. Il cielo del doppio fondo, infatti, costituisce un notevole apporto di materiale resistente posto ad elevata distanza dal centro nave.

2.7.6 La struttura del fianco

I fianchi, oltre a partecipare attivamente alla robustezza longitudinale della nave, devono sopportare il carico idrostatico e gli sforzi dovuti al carico imbarcato.

Per navi di piccole dimensioni generalmente si adottano rinforzi del fianco di tipo trasversale, mentre per le grosse navi cisterna o per le navi portacontenitori, caratterizzate da un doppio fianco, quelli longitudinali.

Il fasciame del fianco è costituito da più corsi di lamiera saldata.

2.7.7 Strutture di rinforzo e di sostegno dei ponti

Il ponte è l'elemento strutturale che sopporta le massime tensioni di trazione e di compressione in quanto situato generalmente alla massima distanza dal centro della sezione considerata.

Qualora sul ponte siano praticate aperture di piccole o grandi dimensioni come boccaporte, particolare cura deve essere posta nello studio della tipologia dei rinforzi, dei collegamenti e dei raccordi.

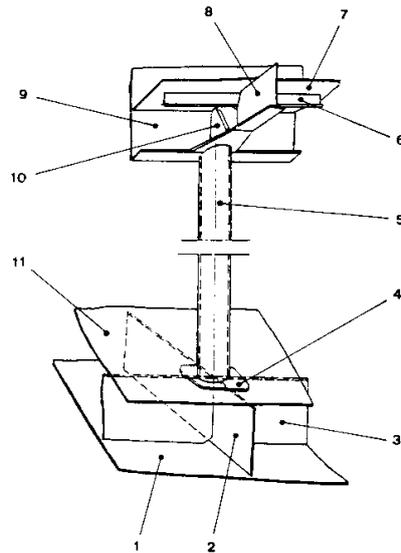
Uno dei particolari da realizzare con miglior cura è il collegamento **cinta-trincarino**; in tale zona di unione fra lamiera del ponte e del fianco si hanno infatti le massime tensioni di trazione/compressione e i massimi sforzi.

Tale collegamento può essere realizzato:

- saldando ad angolo le due lamiere;
- chiodando alla cinta un piatto saldato ad angolo al trincarino;
- saldando di testa al fianco ed al ponte una lamiera sagomata ad arco di cerchio, detta **coppo**.

2.7.7.1 Puntelli

Per aumentare la robustezza del ponte, scaricare i pesi verso il basso e diminuire la campata e quindi le dimensioni del baglio e dell'anguilla, al loro incrocio vengono sistemati dei puntelli.



- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1: lamiera del fondo; | 7: lamiera del ponte; |
| 2: paramezzale; | 8: anguilla; |
| 3: madiere; | 9: mastra della boccaporta; |
| 4: raddoppio di lamiera; | 10: squadra; |
| 5: puntello; | 11: cielo del d.f. |
| 6: baglio; | |

Figura 0.10

Essi devono essere sempre allineati con travi primarie e sono realizzati con tubi in acciaio o profilati a doppio T; pertanto sono sistemati in corrispondenza dell'incrocio fra baglio e anguilla e fra madiere e paramezzale. Il puntello non è direttamente saldato al diamante o al ponte, ma vi si interpone un raddoppio di lamiera in genere di forma circolare e di spessore maggiorato. Inoltre, per limitare i fenomeni di instabilità elastica spesso

vengono saldate al corpo del puntello delle squadrette verticali che lo collegano alle piattabande delle travi che esso sostiene.

2.7.8 Paratie stagne

Come è noto, per motivi di galleggiabilità, stabilità e sicurezza la nave è dotata di un certo numero di paratie stagne trasversali. Per le navi adibite al trasporto di carichi liquidi, inoltre, si hanno sempre paratie longitudinali, previste dalla convenzione Marpol '78. Si tenga presente che lo spessore del fasciame e la dimensione dei rinforzi è decrescente verso il ponte superiore, in quanto il carico che deve sopportare la paratia è di tipo idrostatico.

Si possono indicare tre tipologie costruttive delle paratie stagne. A seconda della tipologia costruttiva, le pp. ss. possono essere:

- paratie a **montanti**;
- paratie a **correnti**;
- paratie **corrugate**.

2.7.9 Le strutture della prora

La prora costituisce una struttura particolarmente rinforzata della nave essendo soggetta a carichi dinamici ed impulsivi molto elevati.

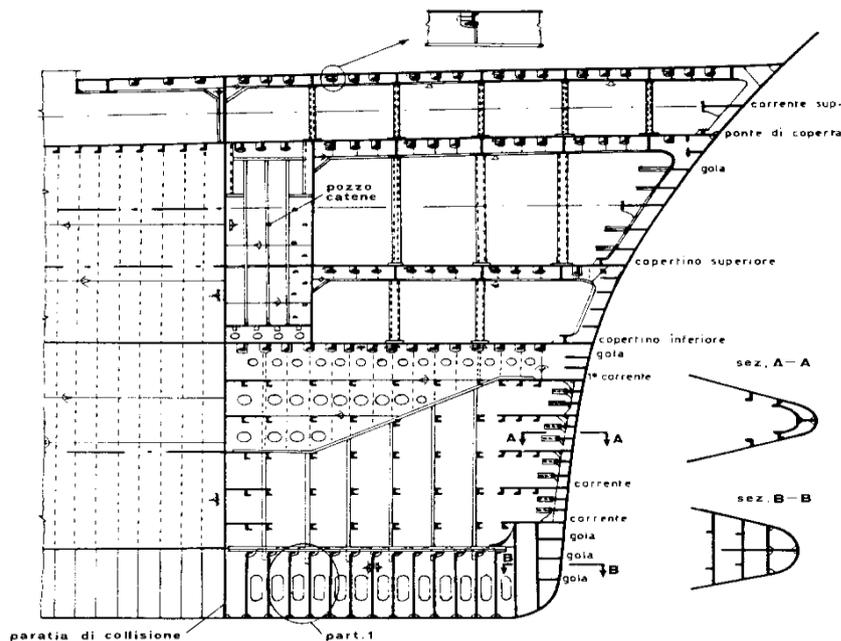


Figura 0.11

Tale struttura è delimitata da una paratia stagna detta **di collisione** a formare il cosiddetto **gavone di prora**, generalmente adibito a cella secca.

La paratia di collisione costituisce una struttura stagna che offre, in caso di urto prodiero, un ostacolo alla formazione di vie d'acqua nelle zone adiacenti della nave; per tale motivo essa è sempre presente e, nel caso di navi mercantili, deve essere posizionata ad una distanza di circa il 5% della Lunghezza fra le Perpendicolari dalla Perpendicolare Avanti.

2.7.10 Le strutture della poppa

Così come la prua, la poppa è costituita da una struttura particolarmente rinforzata di tipo trasversale; essa infatti supporta le strutture di sostegno del timone e dell'elica, è soggetta alle vibrazioni create da quest'ultima e, nelle navi militari, talvolta alloggia apparecchiature A.S. ecc..

Questa zona della nave è delimitata verso prua da una paratia stagna chiamata **paratia del pressatrece** e superiormente dal copertino del **locale agghiaccio** su cui viene sistemata la macchina/e del timone; tali paratie insieme al fasciame esterno delimitano il **gavone di poppa**.

La paratia del pressatrece può coincidere con la paratia poppiera del locale A.M..

Il gavone è stagno e adibito a cella secca o a zavorra per l'assetto della nave o per garantire una idonea immersione dell'elica.

La struttura è trasversale con diaframmi rinforzati ad ogni ossatura.

2.7.11 Strutture nel locale A.M.

Il locale A.M. presenta una struttura rinforzata di tipo prevalentemente trasversale. Tali rinforzi, oltre a sopportare gli elevati carichi locali dovuti ai macchinari, devono garantire la massima rigidezza alle sollecitazioni della trave nave, limitando il più possibile le deformazioni del fondo. Queste, infatti, potrebbero causare pericolosi disallineamenti, usura eccessiva delle parti in movimento e conseguenti malfunzionamenti. Per tale motivo il fondo del locale A.M. deve costituire una rigida fondazione per le macchine.

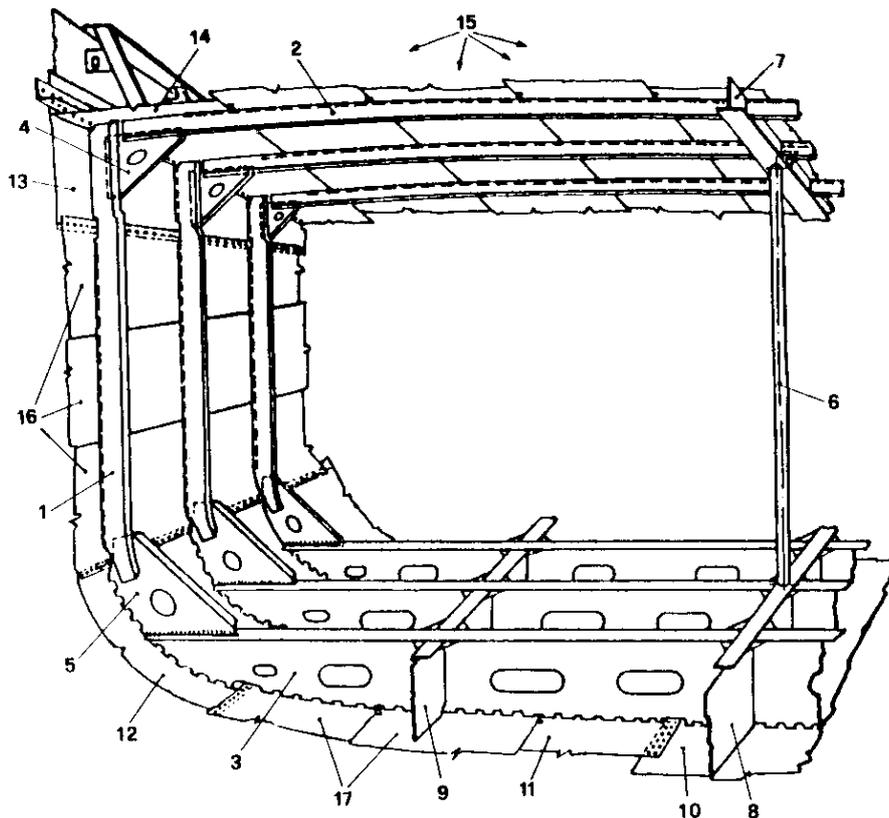
La struttura è trasversale a d.f., con madieri pieni ad ogni ossatura. I paramezzali sono in numero maggiore rispetto alle altre zone della nave ed in corrispondenza dei basamenti dei macchinari.

Il d.f. è adibito a **casse di servizio** e di riserva per tutti i combustibili, i lubrificanti ed i liquidi necessari ai macchinari sistemati nel locale. Spesso il d.f. è a scalini per consentire una idonea sistemazione e allineamento dei macchinari principali.

2.7.12 Il fasciame

Il fasciame costituisce l'involucro esterno stagno della nave. È realizzato saldando lamiere preventivamente tagliate e sagomate, l'una accanto all'altra, a costituire **corsi** disposti longitudinalmente. Partendo dalla mezzeria del fondo della nave fino al ponte, avremo:

- lamiera di **chiglia**;
- 1° corso di lamiera adiacente alla chiglia, detto **torello**;
- 2° corso, detto **controtorello**;
- corsi di fasciame del fondo (3°, 4°, 5° ecc. corso del fondo);
- lamiera/e del **ginocchio**;
- 1°, 2°, 3° ecc. corso del fianco;
- penultimo corso del fianco, detto **sottocinta**;
- ultimo corso di lamiera del fianco, detto **cinta**;
- 1°, 2°, 3° ecc. corso del ponte, dalla mezzeria nave;
- ultimo corso di lamiera del ponte saldato o chiodato alla cinta, detto **trincarino**.



SEZIONE MAESTRA DI UNA NAVE A FONDO SEMPLICE A STRUTTURA TRASVERSALE.

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1 - costola | 10 - chiglia |
| 2 - baglio | 11 - torello |
| 3 - madiere | 12 - ginocchio |
| 4 - squadra o bracciolo | 13 - cinta |
| 5 - squadra esterno-marginale | 14 - trincarino |
| 6 - puntello | 15 - fasciame del ponte |
| 7 - anguilla | 16 - fasciame del fianco |
| 8 - paramezzale centrale | 17 - fasciame del fondo |
| 9 - paramezzale laterale | |

Figura 0.12

DINAMICA DELLA NAVE

3 Resistenza al Rimorchio

Si definisce resistenza al rimorchio di una nave ad una certa velocità la forza necessaria per rimorchiarla a quella velocità in acqua tranquilla, la resistenza così definita è la **resistenza totale**, formata da un certo numero di componenti che interagiscono in modo molto complesso.

Noi supporremo che i vari tipi di resistenza coesistano senza influenzarsi e che la resistenza totale sia data dalla somma delle seguenti componenti:

- *Resistenza di attrito (R_f)*, energia spesa per fare avanzare la carena in un fluido viscoso
- *Resistenza d'onda (R_w)*, energia che deve essere fornita dalla nave al sistema di onde che essa genera sulla superficie dell'acqua; tali treni di onde, divergenti e trasversali, sono prodotti dalle sovrappressioni e depressioni che la carena genera nel suo moto dando luogo a variazioni di livello del pelo libero;
- *Resistenza di scia o dei vortici (R_v)*, energia dispersa nei vortici creati dalla carena e dalle appendici, tale dissipazione è tanto maggiore quanto minore è l'avviamento delle forme.
- *Resistenza dell'aria (R_a)*, energia spesa per far avanzare l'opera morta e le sovrastrutture.

Pertanto risulta:

$$R_t = R_f + R_w + R_v + R_a$$

In genere le componenti R_w ed R_v vengono conglobate nella cosiddetta **Resistenza residua** (R_r), per cui si ha:

$$R_r = R_w + R_v$$

ed infine:

$$R_t = R_f + R_r + R_a$$

LA RESISTENZA DI ATTRITO

Premessa

La piena conoscenza di un fenomeno fisico è tale quando viene verificato e dimostrato da espressioni matematiche.

La resistenza di attrito, fenomeno che interessa un corpo che si muove immerso in un fluido, ancora oggi, non si presta ad un trattamento matematico di carattere generale, per cui il calcolo della resistenza d'attrito in particolare per una nave, continua a basarsi su risultati sperimentali.

3.1 Generalità del fenomeno

Lo studio del fenomeno dell'attrito si basa sul concetto fondamentale che i fluidi poco viscosi come l'acqua possono essere considerati perfetti tranne che in uno strato sottilissimo (lo strato limite) immediatamente a contatto con il solido che si muove nel fluido come nel caso più semplice di una lastra piana.

Si ammette che il primo strato di fluido a contatto con la lastra piana abbia velocità relativa nulla e che ci sia una certa distribuzione delle velocità entro lo strato limite sino a raggiungere il normale valore di velocità dei filetti fluidi non disturbati dalla lastra in movimento.

Sulla base delle distribuzioni delle velocità si può avere moto laminare o turbolento.

3.2 Moto laminare

In maniera semplicistica si può dire che nel moto laminare i filetti fluidi entro lo strato limite si muovono con moto regolare con una distribuzione della velocità ben definibile (vedi figura 2.1).

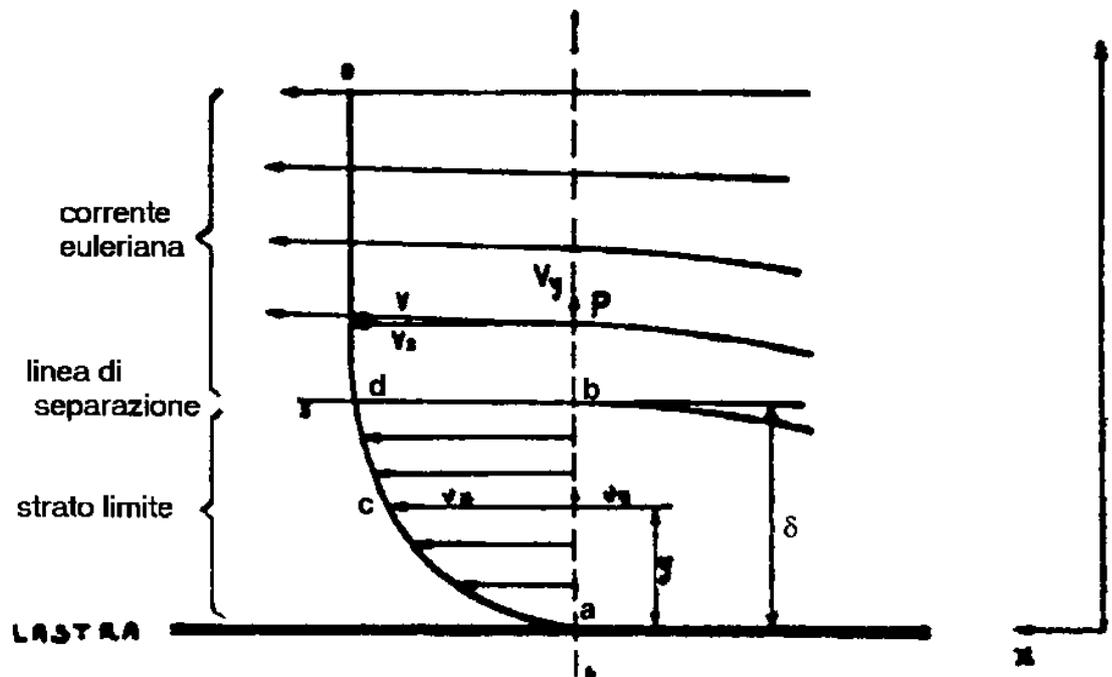


Figura 0 Moto laminare

3.3 Moto turbolento

Il moto turbolento è definito da un moto all'interno dello strato limite molto irregolare con una distribuzione delle velocità sconosciuta (vedi figura 2.2).

È intuitivo supporre ed è comunque verificabile sperimentalmente che quando si passa da moto laminare al moto turbolento la resistenza di attrito aumenta notevolmente.

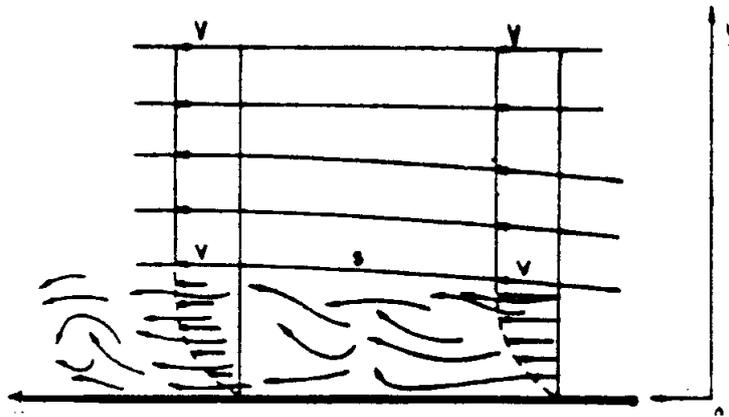


Figura 3.2 Moto turbolento

3.4 Calcolo della resistenza d'attrito per una lastra piana

La resistenza d'attrito per una lastra piana è calcolabile tramite la formula:

$$R_f = C_f \cdot \rho \cdot s \cdot V^2$$

in cui:

C_f = coefficiente di attrito

ρ = densità del fluido

V = velocità relativa

s = superficie della lastra

Termini tutti facilmente quantificabili a parte il C_f .

3.5 Calcolo del coefficiente di attrito C_f

In base a prove condotte nel moto dei fluidi, Reynolds mostrò che le condizioni di deflusso di un fluido su una lastra piana è caratterizzato da un numero, chiamato in seguito numero di Reynolds, dato da:

$$R_n = \frac{VL}{\nu}$$

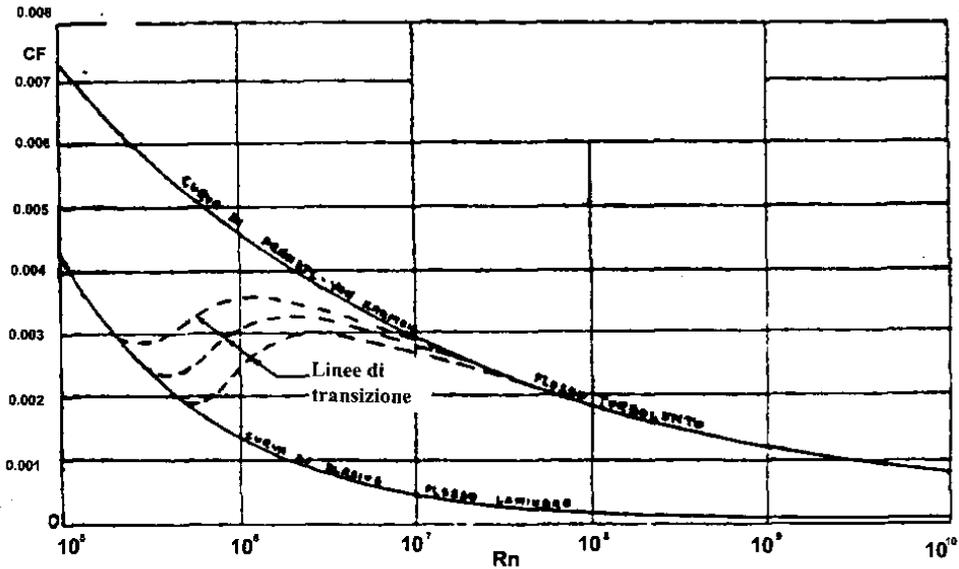
in cui

V = velocità del flusso (in nodi)

L = lunghezza della lastra piana (in piedi)

ν = viscosità cinematica del fluido (in cts)

ed in funzione di R_n è stato ricavato un diagramma che permette di risalire al C_f (vedi figura 2.3) conoscendo il tipo di fluido.



**Figura 3.3 Curve dei coefficienti di attrito per lastre
piane in moto laminare e turbolento**

Dalla figura si evidenziano due curve che rappresentano l'andamento del Cf con moto laminare e turbolento ed una zona intermedia in cui il moto può essere considerato misto.

Valutando il moto di una lastra piana nel fluido tramite prove sperimentali si può risalire alle seguenti determinazioni:

- se $Rn < 5 \cdot 10^5$ il flusso è laminare
- $5 \cdot 10^5 < Rn < 5 \cdot 10^6$ il flusso è misto
- $Rn > 5 \cdot 10^6$ il flusso è turbolento

andando a ricavare il Cf nelle curve corrispondenti una volta conosciuto Rn.

3.6 Calcolo del coefficiente di attrito per una nave

La resistenza d'attrito per una nave o di un suo modello, si può calcolare seguendo il metodo di Froude per il quale la carena viene assimilata ad una lastra piana in cui:

- V = velocità della nave
- S = superficie di carena
- L = lunghezza della nave

Nella realtà per il calcolo del coefficiente di attrito vengono utilizzate in campo navale delle formule empiriche accettabili in Architettura Navale e che sono sufficientemente rispettose dei valori rilevabili nel diagramma in figura 2.3 in funzione del Numero di Reynolds.

In particolare nella vasca navale di Roma viene usata la formula dell'ITTC (International Towing Tane Conference) per cui:

$$C_f = \frac{0,075}{(LgRn - 2)^2}$$

Mentre in altre vasche navali vengono utilizzate formule empiriche simili, il cui confronto è rilevabile in figura 2.4.

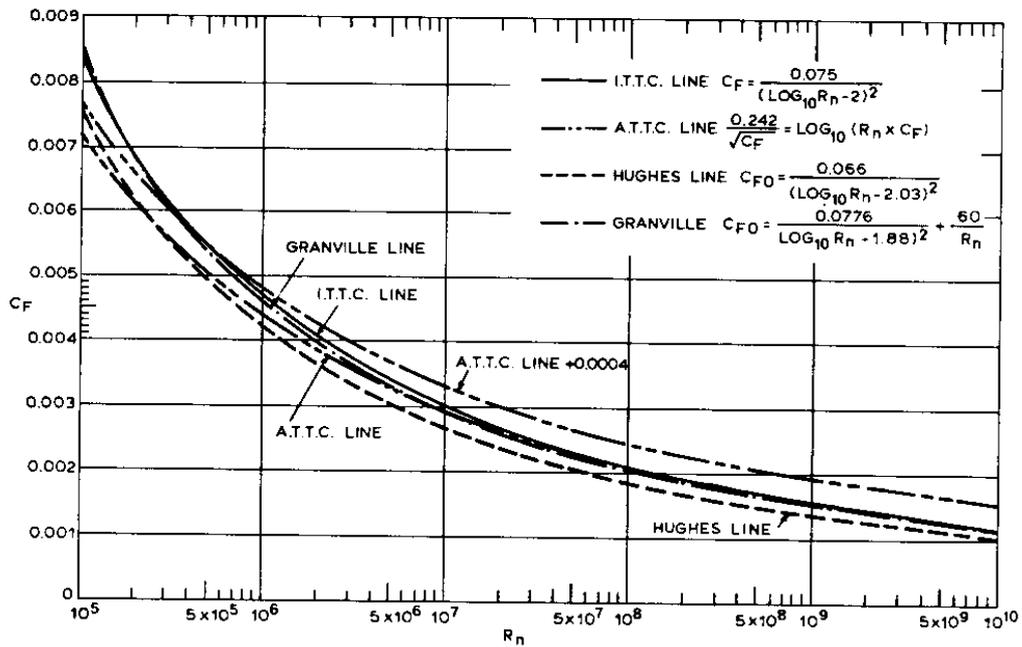


Figura 3.4 Skin friction lines

LA RESISTENZA D'ONDA

Un corpo in movimento sulla superficie del mare produce un sistema d'onde. Tale sistema d'onde, generato dal campo di pressione che si instaura intorno al corpo, assorbe energia dal corpo in movimento ed è pertanto riconducibile ad una resistenza all'avanzo del corpo stesso.

Il sistema d'onde generato dalle navi (figura 3.1) è composta da due tipologie di onde:

- Divergenti che si formano lateralmente alla nave e che hanno le creste inclinate rispetto al piano di simmetria;
- Trasversali che si formano sulle murate della nave e che hanno creste perpendicolari al piano di simmetria della nave.

In particolare si generano due treni di onde divergenti e trasversali nella zona prou e due treni divergenti ed uno trasversale nella zona poppiera.

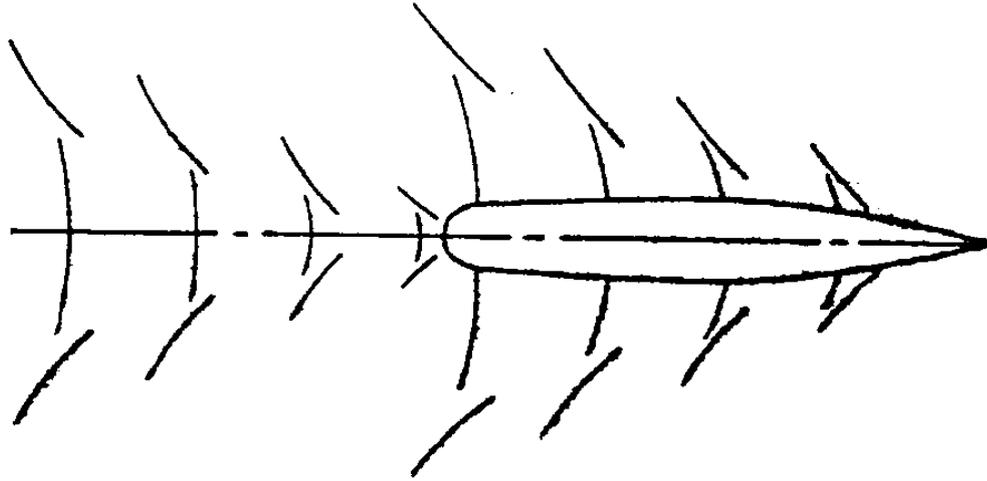


Figura 3.5

Come per la resistenza d'attrito anche la resistenza d'onda è un fenomeno fisico difficilmente trattabile matematicamente ed anche in questo caso per il suo studio è stato necessario ricorrere ad ipotesi semplificative ed a dati sperimentali.

3.7 Studio del fenomeno

È stato possibile caratterizzare il fenomeno in funzione del Numero di Froude:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

In cui:

V = velocità di avanzo della nave

g = accelerazione di gravità

L = lunghezza della nave

Dalla figura 3.2. è possibile verificare, in funzione di V/\sqrt{L} (Quoziente di Taylor, simile al numero di Froude a meno di $1/\sqrt{g}$) l'andamento della resistenza d'onda.

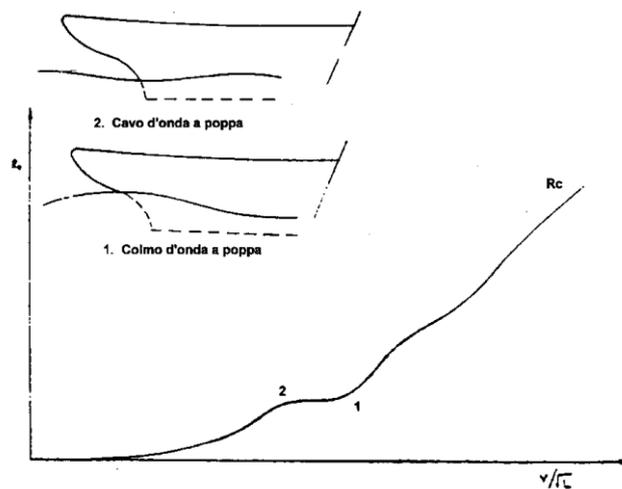


Figura 3.6 Andamento della resistenza d'onda

Le gobbe o i cavi rilevabili nel diagramma sono dovuti all'interferenze tra treni d'onda prodieri e quelli poppieri ed in particolare dalla presenza a poppa di una cresta o di un cavo.

Se consideriamo in modo semplicistico solo i treni d'onda trasversali si può supporre (figura 3.3) che la resistenza d'onda sia data dalla differenza fra la risultante delle forze di pressione che si hanno nella zona prodiera (risultante A diretta nel senso Pr-Pp), e le pressioni che si hanno nella zona poppiera (risultante B diretta nel senso Pp-Pr).

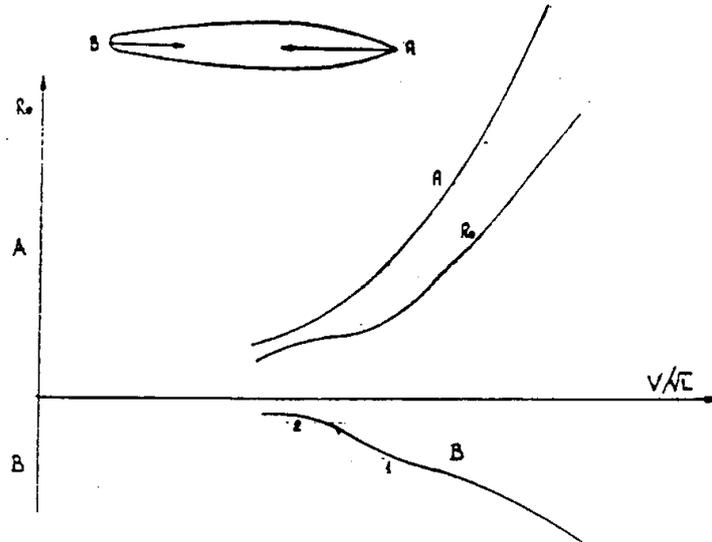


Figura 3.7 Interferenza dei sistemi d'onda prodiero e poppiero

Si nota che mentre la risultante di pressione A cresce costantemente al crescere di v/\sqrt{L} , la risultante B è oscillante a secondo dell'interferenza fra i sistemi di prora e di poppa ed in particolare si avrà una gobba nella curva della resistenza d'onda quando a poppa vi è un cavo e viceversa, un cavo quando a poppa vi è una cresta.

Da un'analisi del diagramma in figura 3.4 si può dedurre che se una nave deve essere veloce, dovrà essere la più lunga possibile in modo da ridurre la resistenza d'onda.

Per un esame meno superficiale della resistenza d'onda, si dovrebbe tenere conto anche delle onde divergenti.

È dimostrato (figura 3.4) che per valori di $v/\sqrt{L} > 1,33$ la resistenza d'onda causata dai treni di onde divergenti diventa significativa e sempre più importante.

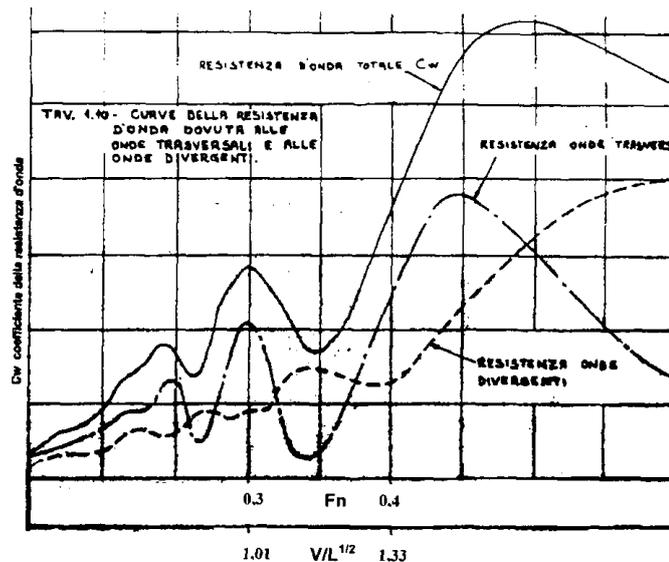


Figura 3.8

4. Calcolo della Resistenza Totale

4.1 Uso di modelli

Nell'ambito progettuale, è necessario poter avere prima della costruzione di una nave, la certezza che la nuova costruzione abbia le caratteristiche di resistenza al moto, tenuta al mare e manovrabilità consone a quanto richiesto in sede contrattuale e ciò a prescindere dal metodo impiegato per la scelta della carena.

Il metodo più usato ed economico è quello di costruire dei modelli in scala opportuna e testarli in opportune vasche trasferendo poi i risultati dal modello alla nave in vera grandezza tramite opportune metodologie sperimentali.

4.2 Determinazione delle dimensioni del modello

Per la determinazione delle dimensioni del modello si trae spunto dal principio secondo il quale "la legge che rappresenta un fenomeno fisico deve essere indipendente dalle unità di misura", da cui si deduce che le funzioni rappresentanti il fenomeno in vera grandezza devono essere le stesse del fenomeno in scala ridotta (principio di omogeneità).

Il fenomeno della resistenza al moto è funzione:

- del numero di Reynolds $Rn = \frac{VL}{\nu}$ (1)
- del numero di Froude $Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ (2)
- del numero di cavitazione $\frac{p}{\rho V^2}$ (3)

La (1) esprime la dipendenza dalla resistenza di attrito.

La (2) esprime la dipendenza dalla resistenza d'onda.

La (3) esprime la dipendenza della resistenza totale dalla pressione insistente.

Poiché, generalmente, la pressione è la stessa sia per la nave che per il modello (pressione atmosferica) è possibile trascurare la funzione relativa per cui restano solo i due termini R_n e R_f a caratterizzare la resistenza totale.

se operiamo a parità di Numero di Reynolds si potrà scrivere:

$$\frac{V_s L_s}{\nu} = \frac{V_M L_M}{\nu}$$

con S = nave
M = modello

E supponendo $\varpi_S = \varpi_M$

$$V_S L_S = V_M L_M$$

Se indichiamo con $\lambda = \frac{L_s}{L_M}$

$$\lambda = \frac{V_M}{V_S} \quad (4)$$

Se operiamo a parità di Numero di Froude potremo scrivere:

$$\frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = \frac{V_S}{\sqrt{gL_S}}$$

ed eliminando g:

$$\sqrt{\lambda} = \frac{V_S}{V_M} \quad (5)$$

Confrontando la (4) e la (5) si deduce che non è possibile operare con un'unica prova su modello per il calcolo della resistenza totale in quanto le due condizioni non possono essere rispettate contemporaneamente.

Per superare tale difficoltà si ricorre alla **ipotesi di Froude**, secondo la quale resistenza di attrito e resistenza residua sono indipendenti (cioè non interagiscono tra loro), la prima funzione del solo numero di Reynolds, la seconda del solo numero di Froude.

Cioè:

$$c_t (R_n, F_n) = c_f (R_n) + c_r (F_n)$$

dove:

$$R_n = \frac{VL_{wl}}{\nu} \qquad F_n = \frac{V}{\sqrt{gL_{wl}}}$$

Sotto questa ipotesi non necessariamente dovranno essere rispettate contemporaneamente le (4) e le (5) per il corretto trasferimento dei risultati dal modello al vero

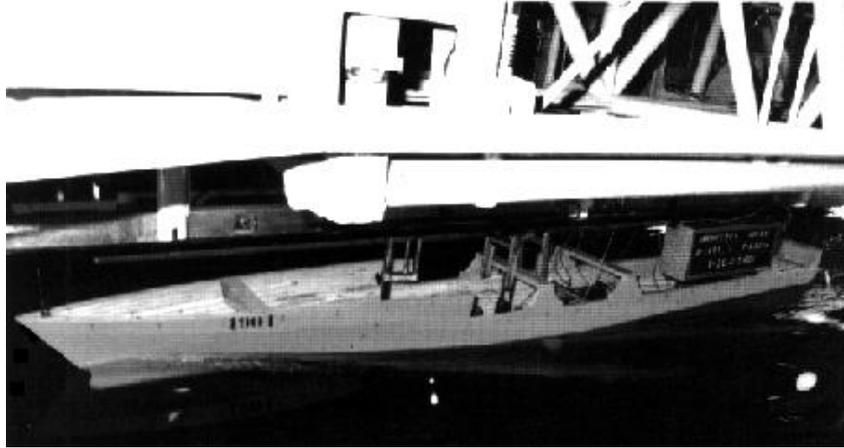


Fig. 4.1

4.3 Calcolo della resistenza di attrito per nave e modello

Per il calcolo della componente di attrito della resistenza, sotto l'ipotesi di Froude, sia per la nave che per un suo modello in scala è sufficiente applicare la formula sperimentale del para 2.7 inserendo il numero di Reynolds corrispondente.

In generale :

$$c_f = \frac{0.075}{(LgRn - 2)^2}$$

Noto che sia c_f , si ricava R_f :

$$R_f = 0.5 \cdot c_f \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$$

Importanza fondamentale agli effetti della componente di attrito ha la *superficie bagnata*; cui questa resistenza è direttamente proporzionale: può essere calcolata, con buona approssimazione, in via preliminare per mezzo di formule sperimentali.

Esistono comunque programmi di calcolo che forniscono l'esatto valore di S avendo come dati di ingresso la geometria della carena come derivata dall' "off-set" del piano di costruzione.

4.4 Calcolo della resistenza residua

Non esistono formule che permettano di calcolare il valore della resistenza residua, a similitudine di quanto visto per la resistenza di attrito; tuttavia il problema della sua determinazione può essere affrontato ricorrendo al **principio di similitudine meccanica**, per il quale esiste una ben determinata relazione tra la resistenza residua del modello impiegato e quella della nave in vera grandezza, purché le prove vengano effettuate a velocità corrispondente, cioè a parità di numero di Froude.

Fissato il rapporto tra lunghezza nave e lunghezza modello:

$$\frac{L_s}{L_m} = \lambda$$

la velocità nave V_s e la velocità modello V_m si definiscono **corrispondenti** quando:

$$\frac{V_s}{V_m} = \sqrt{\lambda}$$

Risulta allora:

$$c_{rs} = c_{rm}$$

ovvero, in termini di resistenza:

$$R_{rs} = R_{rm} \lambda^3$$

In definitiva si può affermare che:

"Le resistenze residue di navi geometricamente simili stanno fra loro come i cubi delle loro dimensioni lineari, se le velocità stanno fra loro come le radici delle dimensioni lineari."

4.5 Trasferimento dei risultati al vero

Per l'applicazione del metodo di Froude si opera con le seguenti modalità

- 1) Costruzione del modello in funzione delle dimensioni della vasca navale in cui vengono effettuate le prove. La scala del modello della nave sarà perciò : $\frac{L_s}{L_m} = \lambda$

- 2) Il modello viene rimorchiato in vasca alla velocità corrispondente : $V_M = \frac{V_S}{\sqrt{\lambda}}$

mediante una stazione mobile di servizio, detta "**carro dinamometrico**", per ottenere la resistenza totale all'avanzamento del modello R_{tm} .

- 3) Si calcola, con le formule del para 2.7, la resistenza di attrito del modello R_{fm} .
- 4) Si ricava la resistenza residua del modello

$$R_{rm} = R_{tm} - R_{fm}$$

- 5) Si ricava la resistenza residua della nave alla velocità corrispondente $V_S = V_M \sqrt{\lambda}$

$$R_{rs} = R_{rm} \lambda^3$$

- 6) Si calcola la resistenza di attrito della nave R_{fs} con le formule del para 2.7
- 7) Si ottiene la resistenza totale della nave

$$R_{ts} = R_{fs} + R_{rs}$$

La resistenza così ottenuta per le diverse velocità è quella della carena liscia; per ottenere la resistenza effettiva di rimorchio occorre aggiungere la resistenza dovuta alla rugosità di carena e alla presenza delle appendici (che fa aumentare la resistenza di attrito) e la resistenza dell'aria ricavabili con formule empiriche.

5 Determinazione della potenza installata

Ottenuta la resistenza totale della nave R_{tS} si ricava la potenza effettiva di rimorchio P_e (Effective Horsepower) con la relazione:

$$P_e = R_{tS} V_S$$

dove V_S è la velocità di progetto della nave.

Per il dimensionamento dell'apparato motore bisogna poi passare dalla potenza di rimorchio alla potenza da installare a bordo; devono quindi essere tenuti in considerazione diversi rendimenti che caratterizzano i vari organi della propulsione:

- η_o = **rendimento di elica isolata**: l'elica, come organo motore, ha un rendimento che si aggira intorno allo 0.5 - 0.65 nelle condizioni ottimali di progetto;
- η_h = **rendimento di carena**: tiene conto del fatto che la carena avanzando trascina una certa massa di acqua, per cui l'elica rispetto all'acqua avanza ad una velocità diversa da quella della nave, e della cosiddetta "deduzione di spinta", che è in realtà un aumento di resistenza dovuto alla risultante delle pressioni idrodinamiche generate dall'elica in moto sulla volta di poppa.
- η_r = **rendimento rotativo**: tiene conto del fatto che il flusso che investe l'elica non è regolare, ma disturbato dalla presenza della carena;
- η_s = **rendimento della linea d'assi**; tiene conto delle perdite di attrito sui cuscinetti e sul riduttore.

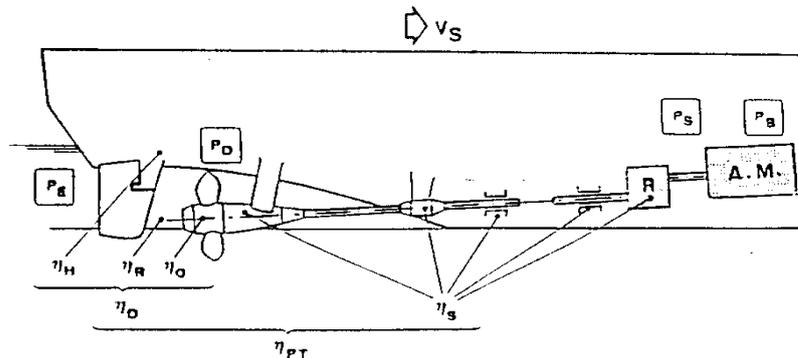


fig.5.1

Si ricava così prima la **potenza all'elica** P_d (Delivered Horsepower) dalla relazione:

$$P_d = \frac{1}{\eta_o \eta_h \eta_r} P_e = \frac{1}{\eta_d} P_e$$

dove η_d = **rendimento propulsivo**.

Quindi si ricava la **potenza all'asse** P_s (Shaft Horsepower) dalla relazione:

$$P_s = \frac{P_d}{\eta_s}$$

La P_s non è la potenza che viene installata a bordo, ma viene solitamente maggiorata del 10-15% per avere un margine di potenza per potere mantenere la velocità corrispondente alla massima potenza continuativa con mare mosso e carena sporca; si ricava così la **potenza al freno** P_b (Brake Horsepower) ed il **rendimento propulsivo totale** η_{pt} legati dalla relazione:

$$\eta_{pt} = \frac{P_e}{P_b}$$

I fenomeni derivati dall'accoppiamento carena-elica vengono accuratamente studiati in vasca con le cosiddette **prove di elica isolata e le prove di autopropulsione** in cui il modello non è trainato ma propulso da un'elica in scala.

In definitiva bisogna ricordare che, per quanto accurato sia il progetto dell'elica, la stessa raggiunge raramente rendimenti superiori a 0.65, di conseguenza la potenza da installare P_b , tenuto conto anche degli altri rendimenti, risulta essere quasi il doppio della potenza di rimorchio P_e .